



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE141599**

**PERHITUNGAN ENERGI BUSUR API LISTRIK  
MENGUNAKAN METODE *TIME DOMAIN* DI PT. PINDO  
DELI**

Hafizs Juniardi  
NRP 2211 105 005

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**ARC FLASH ENERGY CALCULATION USES TIME DOMAIN in  
PT PINDO DELI**

Hafizs Juniardi  
NRP 2211 105 005

Advisor Lecturer  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Ir. Sjamsjul Anam, MT.  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty Of Industry Technology  
Sepuluh Nopember Institute Of Technology  
Surabaya 2015

**PERHITUNGAN ENERGI BUSUR API LISTRIK  
MENGUNAKAN METODE *TIME DOMAIN*  
DI PT. PINDO DELI**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Ir. Margo Pujiatara, MT.**

**NIP. 196603181990101001**

**Ir. Sjamsul Anam, MT.**

**NIP. 196307251990031002**

**SURABAYA  
JULI, 2015**

# PERHITUNGAN ENERGI BUSUR API LISTRIK MENGUNAKAN METODE TIME DOMAIN DI PT.PINDO DELI

**Nama Mahasiswa** : Hafizs Juniardi  
**NRP** : 2211 105 005  
**Dosen Pembimbing** : 1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
2. Ir.Sjamsjul Anam,MT.

## Abstrak

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002 yang mengatur tentang analisa bahaya busur api (*arc-flash*) pada sistem tegangan rendah dan menengah, pengguna dapat dengan mudah menentukan batas keamanan untuk para pekerja. Namun, perlu diperhatikan bahwa standar yang ada diperoleh dari hasil pengukuran insiden energi busur api pada kondisi tertentu dan dikombinasikan dengan teori. Menurut rekomendasi standar IEEE, perhitungan arus hubung singkat selalu memperhatikan kontribusi arus gangguan dari generator, motor induksi dan sinkron. Besar kecilnya energi *arc-flash* dapat ditentukan dari beberapa sudut pandang. Diantaranya ialah nilai energi *arc-flash* akan besar apabila dihitung dengan menggunakan arus *bolted three-phase fault*, sedangkan dari sudut pandang *arc-clearing time* yang didapat dari waktu dimana arus gangguan saat itu terjadi akan menghasilkan nilai energi busur api yang lebih rendah. Hal ini memunculkan metode perhitungan modifikasi yang didasarkan pada perhitungan kontribusi arus hubung singkat dan waktu pemadaman busur api (*arc-clearing time*) sehingga besar energi busur api yang dihasilkan lebih rendah dari standar IEEE 1584-2002. Hal tersebut dapat dijadikan sebagai acuan untuk perbaikan sistem pengaman.

**Kata kunci** : *Arc-clearing time, Bolted three-phase fault dan Modifikasi Perhitungan.*

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

## ***ARC FLASH ENERGY CALCULATION USES TIME DOMAIN in PT. PINDO DELI***

***Name of Student*** : Hafizs Juniardi  
***NRP*** : 2211 105 005  
***Advisors*** : 1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
2. Ir.Sjamsjul Anam,MT.

### ***Abstract***

*Based on the IEEE 1584-2002 standards governing arc hazard analysis at low and medium voltage systems, the user can easily determine the limit of safety for the workers. However, please note that the existing standards obtained from measurements of the arc energy incident on certain conditions and combined with the theory. According to IEEE standard recommendations, the calculation of short circuit current is always concerned the fault current contribution from the generator, induction and synchronous motor. The value of incident energy arc-flash can be determined from several view points. There are the arc-flash energy will be large when calculated using the current bolted three-phase fault, whereas from the another view point of arc-clearing time that obtained from the time of fault current when it occurs will result lower energy values of arc. This raises a new modified calculation method are based on the contributions short circuit current and the arc extinction time (arc-clearing time) so that the arc of the energy produced lower than standard IEEE 1584-2002. It can be used as reference for the improvement of safety systems.*

***Keywords*** : Arc-clearing time, Bolted three-phase fault and Modified Calculation Method.

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Tujuan penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penyusun banyak mendapatkan bantuan bimbingan baik dukungan moril, spiritual maupun materiil, dan dorongan dari berbagai pihak. Untuk itu penyusun ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Segenap keluarga, terutama Ayah, Ibu tercinta. Terima kasih atas semua kasih sayang, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Bapak Ir. Samsul Anam, MT. selaku Dosen Pembimbing yang dengan penuh kesabaran dalam membimbing dan membantu penulis, Dan tidak lupa Bapak Dr. Dedet Candra Riawan, ST, M.Eng. memberikan arahan, masukan, serta motivasi kepada penulis.
3. Rekan-rekan seperjuangan LJ power khususnya Arif Taufik Y, Rendik Valentino, Gigih Himawan yang telah memberikan motivasi kepada penulis.
4. Firdha Ajeng Tunjung Sari yang telah memberikan semangat dan doa kepada penulis saat pengerjaan Tugas Akhir ini.

Dan berbagai pihak yang tidak dapat penulis sebutkan di sini. Semoga Tuhan Yang Maha Esa memberkati dan membalas semua kebaikan yang telah dilakukan. Penulis menyadari masih banyak yang dapat dikembangkan pada Tugas Akhir ini. Oleh karena itu penulis menerima setiap masukan dan kritik yang diberikan. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan memberikan manfaat.

*Wassalamu'alaikum Wr. Wb.*

Surabaya, Juni 2015

Penulis



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL INDONESIA</b> .....	i
<b>HALAMAN JUDUL ENGLISH</b> .....	iii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	xi
<b>LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....	xiii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xxi
 <b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	1
1.3. Batasan Masalah .....	1
1.4. Tujuan .....	2
1.5. Metodologi .....	2
1.6. Relevansi .....	3
1.7. Sistematika Penyusunan .....	4
 <b>BAB II. DASAR TEORI</b>	
2.1. Fenomena Busur Api ( <i>Arc-flash</i> ) .....	5
2.2. Perhitungan Besar Energi Busur Api Berdasarkan Standart IEEE 1584-2002 .....	5
2.2.1 Metode Perhitungan Arus Busur Api Berdasarkan IEEE 1584-2002 ( <i>Arcing Current</i> ) .....	6
2.2.2 Metode Perhitungan Besar Insiden Energi Busur Api Berdasarkan IEEE 1584-2002 .....	6
2.3. Perhitungan dengan Metode <i>Time Domain</i> .....	8
2.3.1 Tegangan 15 KV untuk <i>Switchgear Grounded</i> <i>System</i> .....	9
2.3.2 Perhitungan dengan Pengelompokan Waktu ( <i>Time Domain</i> ) .....	9
2.4. Pengelompokan Kategori Energi Busur Api dengan Perlengkapan Keselamatan Diri Sesuai Standar NFPA 70E=2003 .....	10

	Halaman
2.5. <i>Flash Protection Boundary</i> .....	15
2.2.1 <i>Flash Protection Boundary</i> IEEE 1584-2002.....	16
2.6. Gangguan-Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik .....	17
2.7. Sebab-Sebab Timbulnya Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik.....	19
2.8. Analisa Gangguan Hubung Singkat.....	20
2.8.1 Data yang Diperlukan untuk Analisa Short Circuit .....	21
2.8.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat .....	23
2.9. Jenis Pengaman pada Sistem Tenaga Listrik .....	24
2.10. Rele Pengaman .....	24
2.10.1 Elemen Dasar Rele Pengaman.....	24
2.10.2 Syarat-Syarat Rele Pengaman.....	26
2.11. Rele Arus Lebih ( <i>Overcurrent Relay</i> ).....	28
<b>BAB III. SISTEM KELISTRIKAN PT. PINDO DELI</b>	
3.1 Sistem Jaringan Tenaga Listrik di PT. Pindo Deli .....	29
3.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik di PT. Pindo Deli ....	30
3.2.1 Data Beban di PT. Pindo Deli .....	31
<b>BAB IV. SIMULASI DAN ANALISA</b>	
4.1 Hasil Simulasi Dengan <i>Software</i> ETAP ( <i>Existing</i> ).....	35
4.2 Hasil Simulasi Dengan <i>Software</i> ETAP ( <i>Reseting</i> ) .....	36
4.2.1 Perhitungan Energi Busur Api ( <i>Reseting</i> ).....	37
4.2.2 Perhitungan Energi Busur Api ( <i>Reseting</i> ) dengan Metode <i>Time Domain</i> .....	39
4.3 Perhitungan Energi Busur Api dengan Metode <i>Time Domain</i> setelah Ditambah Rele Diferensial .....	45
4.4 Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i> Menggunakan <i>Software</i> ETAP ( <i>Existing</i> ).....	50
4.5 Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i> Menggunakan <i>Software</i> ETAP ( <i>Reseting</i> ).....	51
4.5.1 Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> ( <i>Reseting</i> ).....	52
4.5.2 Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> ( <i>Reseting</i> ) Hasil dari Metode <i>Time Domain</i> .....	53

	Halaman
4.6 Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> Hasil dari Metode <i>Time Domain</i> Setelah Ditambah Rele Diferensial .....	55
4.7 Perbandingan Antara Energi Busur Api <i>Existing</i> Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Energi Busur Api dengan Metode <i>Time Domain</i> .....	57
4.8 Perbandingan Antara Hasil <i>Flash Protection Boundary Existing, Reseting</i> Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan <i>Flash Protection Boundary</i> Dengan Metode <i>Time Domain</i> .....	58
4.9 Pengaruh Perubahan <i>Fault Clearing Time</i> (Setelah Penambahan Rele Diferensial) Terhadap <i>Incident Energy</i> dan <i>Flash Protection Boundary</i> Dengan Metode <i>Time Domain</i> .....	59
<b>BAB V. PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan .....	61
5.2 Saran – saran .....	62
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	63
<b>LAMPIRAN</b>	

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Data Jarak Percobaan <i>Switchgear</i> Tegangan Menengah .....	7
Tabel 2.2. Data Eksponen Jarak .....	8
Tabel 2.3. Kategori Perlengkapan Pelindung Diri ( <i>Personal Protective Equipment/PPE</i> ).....	11
Tabel 2.4. Efek Arus Listrik Pada Tubuh Manusia .....	13
Tabel 2.5. Perhitungan Short-Circuit Reaktansi Mesin Pada ½ Cycle .....	21
Tabel 2.6. Perhitungan Short-Circuit Reaktansi Mesin Pada 1½-4 Cycle .....	22
Tabel 2.7. Perhitungan Short-Circuit Reaktansi Mesin Pada 30 Cycle.....	23
Tabel 3.1. Data kapasitas dan impedansi sub-transien generator	29
Tabel 3.2. Kelompok dan kebutuhan daya beban di PT. Pindo Deli .....	32
Tabel 3.3. Motor 3.3-kV penunjang sistem internal STG 30-MW	33
Tabel 4.1. Data Energi Busur Api Hasil Simulasi <i>ETAP</i> pada Tiap Bus dengan D=457.2 mm pada Bus 1 dan Bus 2	35
Tabel 4.2. Data Energi Busur Api Hasil Simulasi <i>ETAP</i> pada Tiap Bus dengan D=914.4 mm pada Bus 1 dan Bus 2	36
Tabel 4.3. Data Energi Busur Api Hasil Simulasi <i>ETAP</i> pada Tiap-Tiap Bus Kondisi <i>Resetting</i> .....	37
Tabel 4.4. Data <i>Existing</i> Besarnya <i>Flash Protection Boundary</i> Hasil Simulasi <i>ETAP</i> .....	51
Tabel 4.5. Data <i>Resetting</i> Besarnya <i>Flash Protection Boundary</i> Hasil Simulasi <i>ETAP</i> .....	52
Tabel 4.6. Data Perbandingan IE Eksisting, <i>Resetting</i> Dan <i>Modified</i> .....	57
Tabel 4.7. Data Perbandingan FPB Eksisting, <i>Resetting</i> Dan <i>Modified</i> .....	58
Tabel 4.8. Data Pengaruh FCT Terhadap Besarnya IE.....	59
Tabel 4.9. Data Besarnya FPB Setelah Penambahan Rele Diferensial .....	60

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Salah Satu Penyebab <i>Bolted-Fault Current</i> .....	5
Gambar 2.2 Contoh <i>Single-Line Diagram</i> .....	9
Gambar 2.3 Pakaian Pelindung yang Harus Dikenakan Ketika Bekerja Pada Peralatan Bertegangan .....	12
Gambar 2.4 Klasifikasi Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori .....	12
Gambar 2.5 Dampak Kerusakan Akibat Busur Api .....	14
Gambar 2.6 Ilustrasi Batas Aman dari Konduktor Bertegangan ....	15
Gambar 2.7 Jarak <i>Flash Protection Boundary</i> yang Dapat Menyebabkan Luka Bakar Tingkat Dua .....	16
Gambar 2.8 Secara Umum Klasifikasi Batas Jarak Perlindungan dari Sumber <i>Arcing</i> dengan Pekerja. ....	16
Gambar 2.9 Skema Konsep Kerja Rele .....	24
Gambar 2.10 Bagan Elemen Dasar Rele Pengaman.....	25
Gambar 2.11 Selektivitas Sistem Pengaman .....	26
Gambar 3.1. <i>Single line diagram</i> PT Pindo Deli (disederhanakan). ....	30
Gambar 3.2. <i>Single line diagram</i> PM 6 atau BUS 1 .....	31
Gambar 3.3. <i>Single line diagram</i> substasion PM 7 atau BUS 2 .....	31
Gambar 3.4. <i>Single line diagram</i> substasion PM 1-5 atau BUS 4...	32
Gambar 3.5. <i>Single line diagram</i> PT DSS .....	33



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PT.Pindo Deli merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang industry pulp dan kertas di Indonesia. Analisa tentang busur api sangat penting dilakukan pada sistem pengamanan kelistrikan di suatu industri. Besar kecilnya energi *arc flash* dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor yang dapat mempengaruhi besar kecilnya busur api adalah tegangan sistem, *bolted three phase fault currents* (arus gangguan atau arus hubung singkat), *arcing time* (waktu lamanya busur api), *gap* (jarak antara konduktor) dan jarak antara sumber busur api dengan manusia. Didalam IEEE 1584-2002 telah tercantum aturan yang memuat standar dalam perhitungan *arc flash*. Metode *time domain* merupakan perkembangan dari IEEE 1584-2002, dimana metode ini disarankan pada perhitungan kontribusi arus hubung singkat dan waktu pemadaman busur api ( *arc clearing time* ) sehingga besar perhitungan energy busur api yang dihasilkan lebih rendah dari perhitungan standar IEEE 1584-2002. Hal ini dapat digunakan untuk pedoman perbaikan sistem pengamanan.

### 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah apakah metode modifikasi perhitungan busur api dapat digunakan pada PT Pindo Deli untuk mereduksi busur api yang dihasilkan.

### 1.3 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, Permasalahan akan di batasi dengan asumsi sebagai berikut :

1. Perhitungan besar energi busur api hanya dilakukan pada bus *switchgear* level tegangan menengah
2. Membandingkan besar energi busur api pada simulasi menggunakan *software ETAP* dengan metode modifikasi.

## 1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui kategori busur api pada PT. Pindo Deli menggunakan metode *time domain*.
2. Membandingkan mana yang lebih baik antara metode standar IEEE 1584-2002 dengan metode *time domain*.
3. Hasil dari kategori busur api yang ditemukan dapat dijadikan sebagai pedoman dalam koordinasi sistem pengaman untuk menentukan koordinasi sistem pengaman perlu dilakukan *resetting* atau tidak.
4. Melakukan *resetting* koordinasi sistem pengaman pada rele pengaman yang masih bisa direduksi *setting* waktunya, supaya busur api yang terjadi masuk dalam kategori aman, tetapi koordinasi sistem pengaman tetap dalam kondisi yang benar.

## 1.5 Metodologi

Pada penyusunan Tugas Akhir ini metodologi yang digunakan oleh penulis adalah :

### 1. Studi literatur

Penulis mempelajari literatur mengenai arus hubung singkat, analisa sistem tenaga, koordinasi rele, perhitungan busur api berdasarkan standar maupun metode modifikasi.

### 2. Pengumpulan data

Penulis melakukan pengambilan data yang diperoleh dari PT. Pindo Deli berupa gambar *single line diagram* lengkap dengan spesifikasi peralatannya seperti generator, transformator, motor, CB (*Circuit Breaker*), dan lain-lain.

### 3. Permodelan dan simulasi

Setelah mendapatkan data dan diolah, penulis akan memodelkannya dalam bentuk simulasi dengan melakukan analisa hubung singkat untuk mengetahui besar energi busur api yang dihasilkan dengan menggunakan *software ETAP* dan koordinasi peralatan proteksi menggunakan *ETAP STAR*.

#### 4. Analisa data

Dari simulasi akan didapatkan suatu hasil yang nantinya akan dilakukan analisa. Hasil dari simulasi tersebut adalah arus beban penuh dan arus hubung singkat, dari kedua data tersebut akan digunakan untuk menyusun koordinasi rele guna mereduksi busur api yang dihasilkan.

#### 5. Penulisan buku tugas akhir

Penulisan laporan merupakan kesimpulan akhir yang dapat menggambarkan dari Tugas Akhir ini. Kesimpulan ini berisi mengenai analisa yang telah dilakukan penulis terhadap energi busur api yang dihasilkan pada PT. Pindo Deli.

### 1.6 Relevansi

Hasil yang di peroleh dari tugas akhir ini di harapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Pembelajaran dan penyelesaian persoalan tentang energi busur api yang dihasilkan serta dampak kerusakan yang diakibatkan.
2. Pengelompokkan klasifikasi besar energi busur api sesuai dengan perlengkapan pakaian keselamatan yang diharapkan dapat mengurangi jatuhnya korban jiwa bagi para pekerja disekitarnya.
3. Menjadi referensi untuk penelitian berikutnya agar lebih dikembangkan untuk mereduksi energi busur api dalam kasus yang sama.

## 1.7 Sistematika Penyusunan

### Bab 1 : Pendahuluan

Bab berisi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, relevansi, dan sistematika penulisan.

### Bab 2 : Gangguan dan Sistem Pengaman Pada Sistem Tenaga Listrik

Bab ini membahas tentang fenomena tegangan tembus (*breaking down*), kegagalan isolasi, sebab terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik, analisa hubung singkat, perhitungan energi busur api sesuai standar dan metode modifikasi, klasifikasi rele, penyetelan rele pengaman terutama rele arus lebih serta koordinasi proteksi.

### Bab 3 : Sistem kelistrikan di PT.Pindo Deli

Bab ini menjelaskan mengenai sistem kelistrikan yang ada di PT.Pindo Deli

### Bab 4 : Analisa Perhitungan Besar Energi Busur Api yang Dihasilkan dan *Setting* Rele Arus Lebih

Bab ini membahas mengenai perhitungan energi busur api yang dihasilkan sesuai standar maupun dengan metode modifikasi, setting rele pengaman arus lebih dan koordinasinya.

### Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari keseluruhan pembahasan yang telah dilakukan dari Tugas Akhir ini.

***-Halaman ini sengaja dikosongkan-***

## BAB 2

### BUSUR API LISTRIK

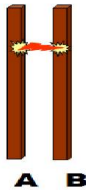
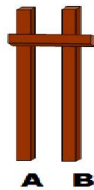
#### 2.1 Fenomena Busur Api Listrik ( *Arc-flash* )

Awal mula *arc-flash* muncul diakibatkan dari adanya *arc-ting fault*. *Arc-ting fault* merupakan busur api yang diakibatkan oleh arus gangguan atau dengan kata lain terjadi kontak langsung dengan konduktor (*arc-ting fault current*). Arus tersebut menciptakan sebuah plasma busur listrik dan melepaskan sejumlah energi yang berbahaya. Busur api listrik merupakan bagian dari arus listrik yang besar melalui udara yang terionisasi [3].

*Arc-ting flash* diakibatkan dari *arc-ting fault* diantara fase bus-bar atau dengan netral (*ground*). Selama *arc-ting fault* terjadi, udara merupakan konduktor dan biasanya muncul pada tegangan lebih dari 120 volt. Besar *arc-ting fault current* biasanya lebih rendah dari besar arus *bolting fault* dan di bawah *rating circuit breaker* [4].

Jumlah energi yang dihasilkan *arc-ting flash* tergantung dari level tegangan tempat arus gangguan terjadi, jarak pekerja dengan sumber *arc-ting* dan waktu yang dibutuhkan peralatan pengaman arus lebih untuk menghilangkan dan mengisolir gangguan.

**Bolting Fault**



Example :



**Gambar 2.1** Salah Satu Penyebab *Bolting-Fault Current* [3]

#### 2.2 Perhitungan Besar Energi Busur Api Berdasarkan Standard IEEE 1584-2002 [1]

Standar untuk analisis acuan besar busur api, yang didapatkan dari hasil pengukuran insiden energi berdasarkan arus hubung singkat dalam kondisi tertentu. Tes yang dilakukan jarang pada tegangan 1000 V ke bawah, yang sering dilakukan pengukuran adalah pada tegangan 2.4 kV atau lebih. Namun pada kesempatan kali ini rumus yang digunakan untuk mengukur besar insiden energi busur api yang ditimbulkan pada sistem 2.4 kV hingga 15 kV.

### 2.2.1 Metode Perhitungan Arus Busur Api Berdasarkan IEEE 1584-2002 ( *Arcing Current* )

Perhitungan besar energi busur api diawali dengan mengetahui besar nilai *arcing current*. Nilainya didapatkan dari hasil arus hubung singkat 3 fasa dan diperoleh dari persamaan sebagai berikut :

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (2.1)$$

dimana,

$\lg = \log_{10}$

$I_a$  = arus busur api / *arcing current* (kA)

$I_{bf}$  = *bolted three-phase fault at the bus symmetrical rms* (kA)

Dari persamaan (2.1) dapat ditulis kembali dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \lg I_a - 0.983 \lg I_{bf} &= 0.00402 \\ \lg I_a - \lg I_{bf}^{0.983} &= 0.00402 \\ \lg ( I_a / I_{bf}^{0.983} ) &= 0.00402 \\ I_a / I_{bf}^{0.983} &= 10^{0.00402} \\ I_a / I_{bf}^{0.983} &= 1.00929 \\ I_a &= 1.01 \times I_{bf}^{0.983} \end{aligned} \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Metode Perhitungan Besar Insiden Energi Busur Api Berdasar IEEE 1584-2002

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011G$$

atau bisa dituliskan dengan persamaan berikut,

$$E_n = I_a^{1.081} \times 10^{(K_1 + K_2 + 0.0011G)} \quad (2.3)$$

Dengan adanya variabel waktu, <sup>(x)</sup> faktor dan jarak antara peralatan dengan pekerja maka akan menghasilkan jumlah energi yang dilepaskan ke udara. Besarnya dapat dituliskan dalam persamaan berikut dalam satuan  $\text{cal/cm}^2$ .

$$E = C_f \times E_n \times (t/0.2)(610/D)^x \quad (2.4)$$

Substitusi  $E_n$  dari persamaan (3) ke (4),



$$E = C_f \times (I_a^{1.081} \cdot 10^{(K_1 + K_2 + 0.0011G)}) (t/0.2)(610/D)^x$$

$$= C_f \times 10^{(K_1 + K_2 + 0.0011G)} (610/D)^x \times I_a^{1.081} (t/0.2) \quad (2.5)$$

Dimana,

- En = Insiden energi normal tanpa pengaruh waktu dan jarak (Joule/cm<sup>2</sup>).
- K<sub>1</sub> = -0.792 untuk konfigurasi terbuka dan -0.555 untuk konfigurasi tertutup atau *box*.
- K<sub>2</sub> = 0 untuk sistem *ungrounded or high-resistance* dan -0.113 untuk sistem *grounded*.
- G = gap antara konduktor (mm)
- E = Insiden energi (cal/cm<sup>2</sup>)
- C<sub>f</sub> = 1.0 untuk tegangan lebih dari 1 kV dan 1.5 untuk tegangan kurang dari 1 kV
- t = *arcing time* (sec) pada alat proteksi di atas bus
- D = jarak pekerja dengan sumber *arcing* (mm)
- x = eksponen jarak
- I<sub>bf</sub> = *bolted three-phase fault at the bus symmetrical rms* (kA)

Besar nilai eksponen jarak dan jarak pekerja (*distance*) dapat dilihat pada tabel di bawah ini, sesuai dengan standar IEEE 1584-2002. Khusus untuk tabel D (*distance*) telah dilakukan percobaan sebelumnya pada level tegangan menengah dengan kotak ukuran 1143 mm × 762 mm × 762 mm.

**Tabel 2.1** Data Jarak Percobaan *Switchgear* Tegangan Menengah [1]

D (mm)	E (J/cm <sup>2</sup> )
610	21.198
610	25.529
610	24.938
610	23.931
762	18.809
762	18.047
762	19.321
762	19.997
914	15.548
914	16.584

**Tabel 2.1** Data Jarak Percobaan *Switchgear* Tegangan Menengah [1] (lanjutan)

914	15.441
914	16.201
1219	11.269
1219	12.337
1219	13.457
1219	10.775
1524	8.756
1524	10.808
1524	10.191
1524	9.677

**Tabel 2.2** Data Eksponen Jarak [1]

System Voltage (kV)	Equipment Type	Typical gap between conductors (mm)	Distance x factor
0.208-1	Open air	10-40	2.000
	Switchgear	32	1.473
	MCC and panels	25	1.641
	Cable	13	2.000
>1-5	Open air	102	2.000
	Switchgear	13-102	0.973
	Cable	13	2.000
>5-15	Open air	13-153	2.000
	Switchgear	153	0.973
	Cable	13	2.000

### 2.3 Perhitungan dengan Metode *Time domain* [2]-

Pada metode *time domain* kali ini terdapat sedikit perbedaan dengan standar yaitu dengan cara mensubstitusikan persamaan energi busur api dengan data real. Dengan demikian memunculkan konstanta baru yang besarnya tergantung dengan data sistem yang telah ada. Selain itu, terdapat pengelompokkan waktu (*time domain*) untuk mengetahui

lamanya selang waktu kontribusi arus hubung singkat yang diberikan serta memperhatikan waktu bekerjanya rele pengamanan.

### 2.3.1 Tegangan 15 kV untuk *switchgear grounded system*.

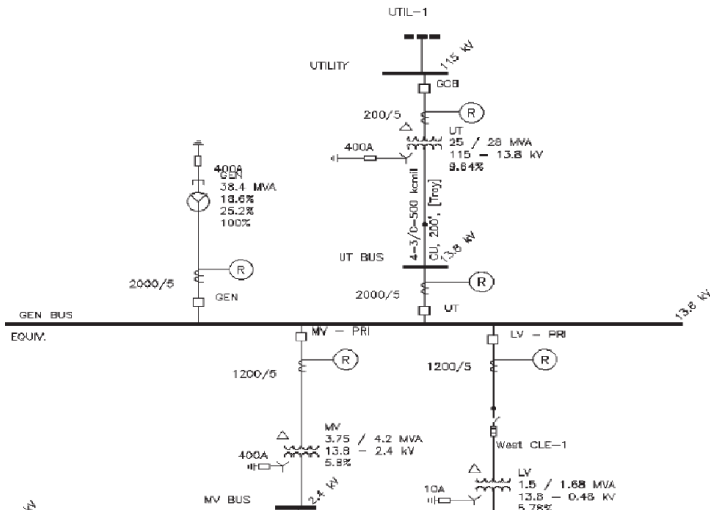
$C_f = 1.0$ ;  $K_1 = -0.555$ ;  $K_2 = -0.113$ ;  $G = 153 \text{ mm}$ ;  $x = 0.973$ ;  
 $D = 914.4 \text{ mm}$

Dari data di atas dapat dituliskan dengan,

$$\begin{aligned} E &= 1 \times 10^{(-0.555 + -0.113 + 0.0011 \cdot 153)} \times (610/914.4)^{0.973} \times I_a^{1.081} (t/0.2) \\ &= 1 \times 10^{-0.4997} \times 0.674 \times I_a^{1.081} \times t/0.2 \\ &= 1 \times 0.316 \times 0.674 \times I_a^{1.081} \times t/0.2 \\ &= 0.213 \times I_a^{1.081} \times t/0.2 \end{aligned}$$

$$E = 1.067 \times I_a^{1.081} \times t \quad \text{atau} \quad E = 1.079 \times I_{br}^{1.063} \times t \quad (2.6)$$

### 2.3.2 Perhitungan dengan Pengelompokkan Waktu (*Time Domain*)



Gambar 2.2 Contoh Single-Line Diagram

UT Breaker arcing time	= 0.83s
GEN Breaker arcing time	= 1.30s
MV-PRI Breaker arcing time	= 1.38s
GCB Breaker arcing time	= 1.71s

### **UT BUS**

Perhitungan insiden energi pada setiap tahap akan dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 0 - 0.035 \text{ Sec.} &= 1.079 \times [(I_{UT@+0\text{sec}} + I_{13\text{kV BUS}+0\text{sec}})^{1.063} \times 0.035] \\
 (E_{0.035\text{sec}}) &= 1.079 \times [(9.83 + 16.97)^{1.063} \times 0.035] \\
 &= 1.079 \times 32.97 \times 0.035 = 1.245 \text{ cal/cm}^2 \\
 0.035-0.067 \text{ Sec.} &= 1.079 \times [(I_{UT@+0.035\text{sec}} + I_{13\text{kV BUS}+0.035\text{sec}})^{1.063} \times 0.032] \\
 (E_{0.067\text{sec}}) &= 1.079 \times [(9.63 + 10.52)^{1.063} \times 0.032] \\
 &= 1.079 \times 24.35 \times 0.032 = 0.849 \text{ cal/cm}^2 \\
 0.067 - 0.8 \text{ Sec.} &= 1.079 \times [(I_{UT@+0.675\text{sec}} + I_{13\text{kV BUS}+0.67\text{sec}})^{1.063} \times 0.733] \\
 (E_{0.8\text{sec}}) &= 1.079 \times [(8.83 + 10.44)^{1.063} \times 0.733] \\
 &= 1.079 \times 23.22 \times 0.733 = 19.372 \text{ cal/cm}^2 \\
 0.8 - 0.83 \text{ Sec.} &= 1.079 \times [(I_{UT@+0.835\text{sec}} + I_{13\text{kV BUS}+0.83\text{sec}})^{1.063} \times 0.03] \\
 (E_{0.83\text{sec}}) &= 1.079 \times [(9.66 + 4.82)^{1.063} \times 0.03] \\
 &= 1.079 \times 17.14 \times 0.03 = 0.561 \text{ cal/cm}^2 \\
 0.83 - 1.71 \text{ Sec.} &= 1.079 \times [(I_{UT@t\text{sec}})^{1.063} \times 0.88] \\
 (E_{1.71\text{sec}}) &= 1.079 \times [(9.83)^{1.063} \times 0.83] \\
 &= 1.079 \times 11.35 \times 0.88 = 10.774 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

Jadi, total insiden energi pada 13.8 kV UT BUS adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 E_{UT \text{ BUS total}} &= E_{0.035\text{sec}} + E_{0.067\text{sec}} + E_{0.8\text{sec}} + E_{0.83\text{sec}} + E_{1.71\text{sec}} \\
 &= 32.80 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

## **2.4 Pengelompokkan Kategori Energi Busur Api dengan Perlengkapan Keselamatan Diri sesuai Standar NFPA 70E-2003**

Setelah dilakukan perhitungan energi busur api yang dihasilkan. Langkah selanjutnya adalah mengkategorikan perlengkapan keselamatan yang harus digunakan bagi siapa saja yang masuk ke area tersebut

(workers). Kategori ini didasari atas besarnya energi yang dihasilkan serta dampak yang ditimbulkan bagi tubuh manusia.

Selain itu juga menentukan *flash boundary protection* yaitu jarak antara pekerja tanpa alat perlindungan diri dengan sumber busur api langsung. Perlengkapan apa saja yang harus digunakan diatur dalam standar NFPA 70E-2003. Namun hal kontras justru terjadi dimana alat perlindungan diri didasarkan untuk menahan panas dengan maksimum energi sedangkan IEEE 1584-2002 berdasarkan dari hasil pengukuran. Oleh karena itu, sering kali terjadi perlindungan berlebih yang dapat mengurangi efektifitas pekerja karena sulit bergerak akibat peralatan pelindung yang berat dan kaku.

**Tabel 2.3** Kategori Perlengkapan Pelindung Diri (*Personal Protective Equipment/PPE*) [3]

Category	Cal/cm <sup>2</sup>	Clothing
0	1.2	Untreated Cotton
1	4	Flame retardant (FR) shirt and FR pants
2	8	Cotton underwear FR shirt and FR pants
3	25	Cotton underwear FR shirt, FR pants and FR coveralls
4	40	Cotton underwear FR shirt, FR pants and double layer switching coat and pants



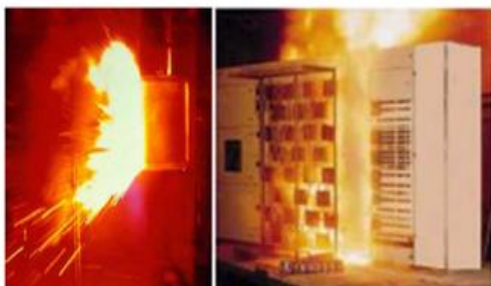
**Gambar2.3** Pakaian Pelindung yang Harus Dikenakan Ketika Bekerja Pada Peralatan Bertegangan




**Gambar 2.4** Klasifikasi Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori [3]

**Tabel 2.4** Efek Arus Listrik Pada Tubuh Manusia [4]

Current	Reaction
Below 1 milliampere	Generally not perceptible
1 milliampere	Faint tingle
5 milliamperes	Slight shock felt; not painful but disturbing. Average individual can let go. Strong involuntary reactions can lead to other injuries.
6-25 milliamperes (women)	Painful shock, loss of muscular control
9-30 milliamperes (men)	The freezing current or “let-go” range. Individual cannot let go, but can be thrown away from the circuit if extensor muscles are stimulated.
50-150 milliamperes	Extreme pain, respiratory arrest, severe muscular contractions. Death is possible.
1000-4300 milliamperes	Rhythmic pumping action of the heart ceases. Muscular contraction and nerve damage occur; death likely.
10000 milliamperes	Cardiac arrest, severe burns; death probable.



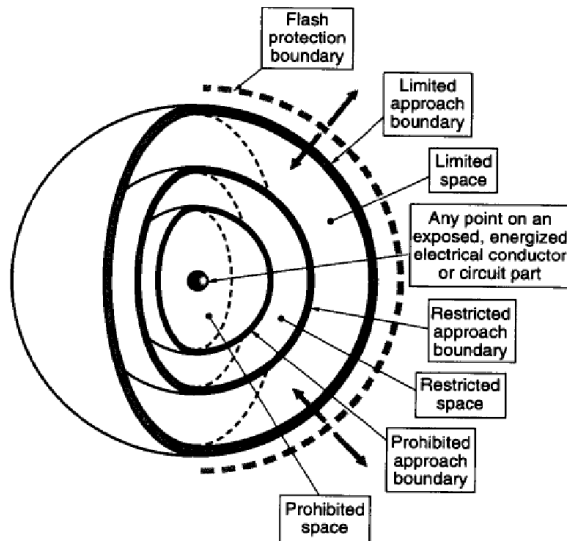
 <b>WARNING</b>	
<b>Arc Flash and Shock Hazard Appropriate PPE Required</b>	
3' - 4' 4.9 #2	Flash Hazard Boundary cal/cm <sup>2</sup> Flash Hazard at 18 inches PPE Level Cotton underwear plus FR shirt and FR pants
0.45 3' - 6" 1' - 0" 0' - 1"	kV Shock Hazard when cover is removed Limited Approach Restricted Approach - Class 00 Voltage Gloves Prohibited Approach - Class 00 Voltage Gloves
Equipment Name SWG-2A	
IEEE 1584 Hazards; Project 1289A – Safety Procedure #A6D24 – EasyPower File: "Plant-A6.dez" – Date: September 9, 2003	

**Gambar 2.5** Dampak Kerusakan Akibat Busur Api [4]



## 2.5 Flash Protection Boundary [5]

Pendekatan batas jarak dari bagian konduktor aktif dimana orang pada jarak tersebut dapat terpapar luka bakar tingkat dua jika ledakan busur api listrik terjadi. Jarak tersebut dapat diketahui apabila besar energi busur api listrik tersebut telah terhitung.

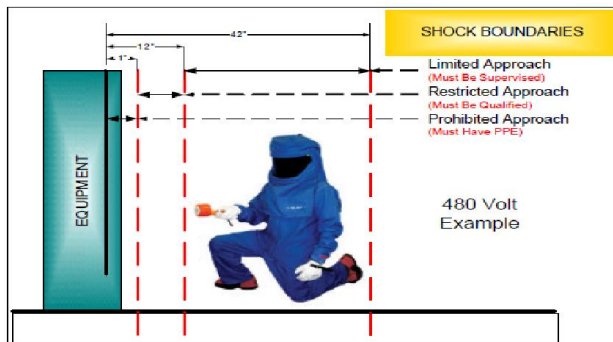


**Gambar 2.6** Ilustrasi Batas Aman dari Konduktor Bertegangan

- a. *Limited Approach Boundary*  
Batas pendekatan jarak dari bagian konduktor aktif dimana terdapat sebuah bahaya sengatan listrik.
- b. *Restricted Approach Boundary*  
Batas pendekatan jarak dari bagian konduktor aktif dimana terdapat peningkatan resiko *shock* yang terjadi karena busur api dikombinasikan dengan gerakan tidak sengaja pekerja.
- c. *Prohibited Approach Boundary*  
Batas pendekatan jarak dari konduktor aktif dimana pekerja dianggap seperti melakukan kontak langsung dengan konduktor aktif.



**Gambar 2.7** Jarak *Flash Protection Boundary* yang Dapat Menyebabkan Luka Bakar Tingkat Dua.



**Gambar 2.8** Secara Umum Klasifikasi Batas Jarak Perlindungan dari Sumber *Arcing* dengan Pekerja.

### 2.5.1 *Flash Protection Boundary* IEEE 1584-2002

*Flash Protection Boundary* merupakan jarak batas dimana seseorang tanpa memakai alat pelindung yang memadai (*Personal Protective Equipment/PPE*) dapat terkena luka bakar tingkat dua yang dapat disembuhkan akibat ledakan busur api. Metode perhitungan jarak tersebut dijelaskan menurut persamaan berikut.

$$D_B = [ 4.184 \times C_f \times E_n \times (t/0.2)(610^x/E_B) ]^{1/x} \quad (2.7)$$

Dimana,

$D_B$  = batas jarak dari titik *arcing* (mm)

$C_f$  = faktor pengali

1.0 untuk tegangan di atas 1 kV

1.5 untuk tegangan di bawah 1 kV

$E_n$  = incident energy normalized

$E_B$  = incident energy in J/cm<sup>2</sup> at the boundary distance  
can be set at 5.0 J/cm<sup>2</sup> for bare skin (no hood)

$t$  = waktu (detik)

$x$  = eksponen jarak

## 2.6 Gangguan – Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Pada dasarnya suatu gangguan adalah keadaan suatu sistem yang tidak normal dimana keadaan ini dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Adanya gangguan pada suatu sistem tenaga listrik atau penyediaan listrik ini tidak dapat dihindari. Ketika terjadi gangguan maka sistem proteksi tenaga listrik harus dapat mengisolasi arus gangguan agar tidak terjadi kerusakan pada peralatan dan menjaga kontinuitas pelayanan pada bagian sistem tenaga listrik yang tidak mengalami gangguan.

Pada sistem tenaga listrik, gangguan – gangguan (*fault*) yang terjadi dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

### 1. Gangguan listrik

Jenis gangguan ini adalah gangguan listrik yang timbul dan terjadi pada bagian – bagian listrik.

Gangguan – gangguan tersebut antara lain :

- Gangguan hubung singkat 3 (tiga) fasa
- Gangguan hubung singkat 2 (dua) fasa
- Gangguan hubung singkat 1 (satu) fasa
- Gangguan beban lebih (Overload)
- Gangguan tegangan lebih

## 2. Gangguan mekanis

Jenis gangguan ini terjadi dikarenakan adanya kerusakan secara fisik dari peralatan. Selain itu jenis gangguan mekanis ini juga berhubungan pada ketahanan fisik dari peralatan tenaga listrik.

## 3. Gangguan sistem

Jenis gangguan ini terjadi dikarenakan keadaan sistem. Dimana gangguan ini berhubungan dengan kondisi parameter pada sistem, yaitu tegangan, frekuensi dan daya.

## 4. Gangguan akibat operasi sistem

Jenis gangguan ini terjadi dikarenakan beroperasinya sistem. Perbedaan gangguan akibat operasi sistem dan sistem, yaitu gangguan akibat operasi sistem menitikberatkan pada bekerja suatu peralatan yang akan menimbulkan gangguan.

Sumber gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh dua faktor yaitu dari dalam sistem dan dari luar sistem. Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain:

1. Tegangan dan arus abnormal.
2. Pemasangan yang kurang baik.
3. Kesalahan mekanis karena proses penuaan
4. Beban lebih.
5. Kerusakan material seperti isolator pecah, kawat putus, atau kabel cacat isolasinya.

Sedangkan untuk gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain:

1. Gangguan-gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran lain. Gangguan ini terjadi untuk sistem kelistrikan bawah tanah.
2. Pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir. Pada gangguan surja petir dapat mengakibatkan gangguan tegangan lebih dan dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus isolasi peralatan (*breakdown*).
3. Pengaruh lingkungan seperti pohon, binatang dan benda-benda asing serta akibat kecerobohan manusia.

Bila ditinjau dari segi lamanya gangguan dapat dikelompokkan menjadi dua macam yaitu:

1. Gangguan yang bersifat temporer, yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Gangguan sementara jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan

sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman dapat berubah menjadi gangguan permanen.

2. Gangguan yang bersifat permanen, dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan dan/atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

## **2.7 Sebab-Sebab Timbulnya Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik**

Dalam sistem tenaga listrik tiga fasa, gangguan – gangguan arus lebih yang mungkin terjadi adalah sebagai berikut yaitu :

### **a. Gangguan beban lebih ( *overload* )**

Merupakan gangguan dimana arus yang mengalir melebihi arus nominal yang diijinkan ( $I > I_n$ ). Bila gangguan ini dibiarkan berlangsung terus menerus maka dapat menyebabkan rusaknya peralatan listrik yang dialiri arus tersebut. Pencegahan gangguan semacam ini dapat dilakukan dengan mengatur alokasi pembangkitan agar tidak ada bagian tertentu dalam sistem yang mengalami beban lebih. Namun hal ini tidaklah selalu mungkin dilakukan karena tergantung kepada keadaan sistem.

### **b. Gangguan Hubung Singkat**

Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua macam yaitu: gangguan hubung singkat seimbang (*balance faults*) dan gangguan hubung singkat tidak seimbang (*unbalance faults*) atau simetri dan tidak simetri (asimetri). Gangguan ini dapat mengakibatkan mengalirnya arus lebih pada fasa yang terganggu. Selain itu gangguan ini juga dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu. Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetri.

### **c. Gangguan tegangan lebih**

Gangguan tegangan lebih diakibatkan karena adanya kelainan pada sistem. Gangguan tegangan lebih dapat terjadi antara lain karena:

- Gangguan petir
- Gangguan surja hubung, di antaranya adalah penutupan saluran tak serempak pada pemutus tiga fasa, penutupan kembali saluran dengan cepat, pelepasan beban akibat

gangguan, penutupan saluran yang semula tidak masuk sistem menjadi masuk sistem, dan sebagainya.

Akibat-akibat yang ditimbulkan oleh adanya gangguan antara lain :

1. Jenis gangguan yang tidak normal dari batas yang diijinkan akan menyebabkan arus yang besar mengalir pada saluran sistem tenaga listrik.
2. Suatu gangguan dapat menurunkan, menghilangkan atau menaikkan sistem tegangan diluar batas yang ditentukan.
3. Gangguan hubung singkat dan gangguan yang memancarkan listrik dalam cairan dapat menyebabkan temperatur yang sangat tinggi sehingga dapat menguapkan material atau zat, merusakkan peralatan serta dapat menimbulkan api.
4. Gangguan dapat mengakibatkan sistem daya tiga fasa menjadi tidak simetri atau tidak seimbang, hal ini menyebabkan peralatan tiga fasa tidak layak untuk dioperasikan.
5. Gangguan dapat menghalangi aliran daya
6. Gangguan dapat mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil dan menghentikan aliran daya sistem tenaga listrik.

## **2.8 Analisa Gangguan Hubung Singkat**

Dalam studi *short circuit*, semua perhitungan dianggap ideal (semua tegangan dianggap 1 pu). Nilai tegangan kapasitansi charging dan beban statis diabaikan. Tap transformer dapat ditetapkan pada posisi nominal atau posisi tapnya dan skema yang berbeda tersedia untuk sistem impedansi transformator. Diasumsikan bahwa gangguan terjadi terbatas bus yang di-*fault* dan resistansi *short circuit* diabaikan. Sistem diasumsikan seimbang dan metode komponen simetris digunakan untuk gangguan yang tidak seimbang.

## 2.8.1 Data yang Diperlukan untuk Analisa Short Circuit

### a. Perhitungan Arus Short-Circuit pada Kondisi Sesaat ( $\frac{1}{2}$ Cycle)

Kondisi  $\frac{1}{2}$  cycle juga disebut sebagai kondisi subtransient, terutama karena semua mesin berputar diwakili oleh reaktansi subtransientnya, seperti yang ditunjukkan dalam tabel berikut :

**Tabel 2.5** Perhitungan Short-Circuit Reaktansi Mesin Pada  $\frac{1}{2}$  Cycle

Tippe Motor	Xsc
Utility	$X''_d$
Turbo generator	$X''_d$
Hydro-generator dengan amortisseur winding	$X''_d$
Hydro-generator tanpa amortisseur winding	$0,75 X''_d$
Condenser	$X''_d$
Synchronous motor	$X''_d$
<b>Motor Induksi</b>	
> 1000 hp @ 1800 rpm atau kurang	$X''_d$
> 250 hp @ 3600 rpm	$X''_d$
Semua jenis > 50 hp	$1,2 X''_d$
< 50 hp	$1,67 X''_d$

### b. Perhitungan Arus Short-Circuit pada Kondisi Interrupting ( $1\frac{1}{2}$ -4 cycle)

Kondisi 1,5-4 cycle juga disebut sebagai kondisi transient. Jenis mesin yang berputar dan representasinya ditampilkan dalam tabel berikut:

**Tabel 2.6** Perhitungan Short-Circuit Reaktansi Mesin Pada 1½-4 Cycle

<b>Tipe Motor</b>	<b>X<sub>sc</sub></b>
Utility	$X'_d$
Turbo generator	$X'_d$
Hydro-generator dengan amortisseur winding	$X'_d$
Hydro-generator tanpa amortisseur winding	$0,75 X'_d$
Condenser	$X'_d$
Synchronous motor	$1,5 X'_d$
Motor Induksi	
> 1000 hp @ 1800 rpm atau kurang	$1,5 X'_d$
> 250 hp @ 3600 rpm	$1,5 X'_d$
Semua jenis > 50 hp	$30 X'_d$

**c. Perhitungan Arus Short-Circuit pada Kondisi Steady State (30 Cycle)**

Jenis mesin yang berputar dan representasinya dalam kondisi 30-cycle dapat dilihat pada tabel berikut. Perlu diketahui bahwa mesin induksi, motor sinkron, dan kondensor tidak dipertimbangkan dalam perhitungan short circuit 30-cycle.



**Tabel 2.7** Perhitungan Short-Circuit Reaktansi Mesin Pada 30 Cycle

Tipe Motor	Xsc
Utility	X <sub>d</sub>
Turbo generator	X <sub>d</sub>
Hydro-generator dengan amortisseur winding	X <sub>d</sub>
Hydro-generator dengan amortisseur winding	X <sub>d</sub>
Kondenser	Infinity
Motor sinkron	Infinity
Motor Induksi	Infinity

### 2.8.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan praktis untuk menghitung besar arus hubung singkat dalam sistem distribusi tegangan menengah dapat dilakukan sebagai berikut :

- a. Gangguan hubung singkat tiga fasa [6]

$$I_{hs_{3\phi}} = \frac{V_N}{Z_1} \quad (2.8)$$

- b. Gangguan hubung singkat fasa – fasa [6]

$$I_{hs_{2\phi}} = \frac{\sqrt{3} V_N}{Z_1 + Z_2} \quad (2.2)$$

$Z_1$  dan  $Z_2$  masing- masing merupakan impedansi urutan positif dan negatif yang mempunyai besaran nilai yang sama, maka didapatkan :

$$I_{hs_{2\phi}} = \frac{\sqrt{3} V_N}{2Z_1}$$

Dimana :  $V_N$  adalah tegangan fasa to netral

## 2.9 Jenis Pengaman pada Sistem Tenaga Listrik

Untuk mengatasi akibat-akibat negatif dari berbagai macam gangguan-gangguan di atas, maka diperlukanlah rele pengaman. Maksud dari sistem tenaga listrik adalah untuk menghasilkan dan menyalurkan energi listrik ke konsumen. Sistem harus dirancang dan dikendalikan untuk pengiriman energinya ke pengguna secara handal dan ekonomis.

Fuse dan rele merupakan suatu komponen pengaman yang sering kali digunakan dalam sistem kelistrikan di industri pada umumnya. Fuse merupakan alat pengaman paling sederhana dalam sistem proteksi, dimana fuse akan bekerja berdasarkan arus lebih ketika terjadi short circuit. Sedangkan rele merupakan bagian dari peralatan sistem tenaga listrik yang digunakan untuk memberikan sinyal kepada *circuit breaker* (CB), untuk dapat memutuskan atau menghubungkan pelayanan penyaluran pada elemen sistem tenaga listrik. Rele akan memberikan sinyal kepada *circuit breaker* untuk memutuskan sistem tenaga listrik jika terjadi gangguan.

Dalam beberapa kasus rele melakukan pengukuran atau perbandingan operasi dasar input dan mengubahnya dalam bentuk gerakan kontak. Keadaan keluaran dari rele adalah menutup (*close*) dan ditahan (*block*). Jika keadaan tertutup maka rele akan memberikan sinyal untuk melakukan proses pembukaan dari *circuit breaker* dimana pada gilirannya akan mengisolasi gangguan dari bagian sistem tenaga listrik lain yang sehat seperti yang digambarkan pada Gambar 2.9.

Didalam penyetelan sebuah rele harus dilakukan dengan benar agar tidak terjadi kesalahan operasi pada saat terjadi gangguan. Oleh karena itu hal-hal yang mempengaruhi dalam penyetelan rele harus benar-benar diperhatikan.

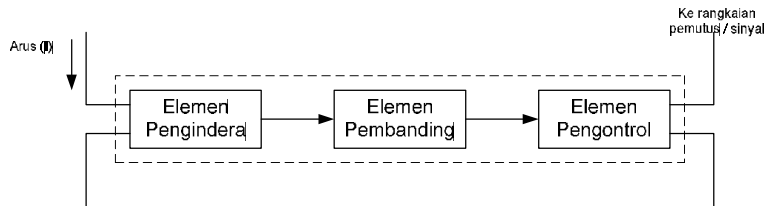


**Gambar 2.9** Skema Konsep Kerja Rele

## 2.10 Rele Pengaman

### 2.10.1 Elemen Dasar Rele Pengaman

Rele pengaman biasanya dipisahkan menjadi tiga elemen dasar seperti terlihat pada Gambar 2.10 :



**Gambar 2.10** Bagan Elemen Dasar Rele Pengaman

#### **a. Elemen Pengindera.**

Elemen ini berfungsi untuk merasakan besaran-besaran listrik seperti arus, tegangan, frekuensi, dan sebagainya tergantung rele yang digunakan. Pada elemen ini besaran yang masuk akan dirasakan keadaannya apakah keadaan yang diproteksi mendapatkan gangguan atau dalam keadaan normal yang untuk selanjutnya besaran tersebut dikirimkan ke elemen pembanding. Komponen yang berfungsi sebagai elemen pengindera adalah transformator arus (CT).

#### **b. Elemen Pembanding**

Elemen ini berfungsi menerima besaran setelah terlebih dahulu besaran itu diterima oleh elemen pengindera untuk membandingkan besaran listrik pada saat keadaan normal dengan besaran yang *disetting* pada rele. Komponen yang berfungsi sebagai elemen pembanding ini adalah rele, yang bekerja setelah mendapatkan besaran dari elemen pengindera dan membandingkan dengan besaran arus penyetelan dan kerja rele.

#### **c. Elemen Kontrol**

Elemen ini berfungsi untuk mengadakan perubahan secara cepat pada besaran ukurnya dan akan segera memberikan isyarat untuk membuka *circuit breaker* atau memberikan sinyal. Komponen yang berfungsi sebagai elemen kontrol adalah kumparan penjatuh (*trip-coil*).

### 2.10.2 Syarat-Syarat Rele Pengaman

Dalam memilih suatu perlindungan yang sesuai dengan kepentingan dan keadaan daerah perlindungan, maka diperlukan pertimbangan-pertimbangan kemampuan untuk melindungi suatu sistem tenaga. Rele pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

#### a. Kecepatan Bereaksi

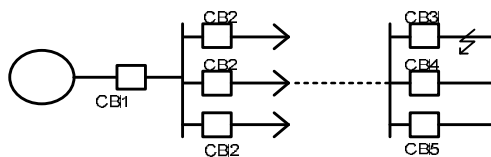
Kecepatan bereaksi rele adalah saat rele mulai merasakan adanya gangguan sampai dengan pelaksanaan pembukaan pemutus tenaga (*circuit breaker*). Waktu bereaksi diusahakan sesingkat mungkin sehingga kerusakan yang terjadi semakin kecil, serta dapat mengurangi meluasnya akibat dari adanya gangguan itu sendiri sehingga kestabilan sistem dapat menjadi lebih baik. Kecepatan bereaksi rele merupakan faktor yang sangat penting dalam pengamanan [7]. Saat mulai ada gangguan sampai pelepasan pemutus, dimana kadang-kadang diperlukan kelambatan waktu [7]:

$$t_{op} = t_p + t_{cb} \quad (2.9)$$

dimana;  $t_{op}$  = waktu total  
 $t_p$  = waktu bereaksi dari unit rele  
 $t_{cb}$  = waktu pelepasan CB

#### b. Selektivitas (*selectivity*)

Pengaman harus dapat memisahkan bagian sistem yang terganggu sekecil mungkin yaitu hanya seksi yang terganggu saja yang menjadi kawasan pengamanan utamanya. Pengamanan sedemikian disebut pengamanan yang selektif. Jadi rele harus dapat membedakan apakah gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat atau terletak di seksi berikutnya dimana ia harus bekerja dengan waktu tunda atau harus tidak bekerja sama sekali karena gangguannya di luar daerah pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan. Guna mendapatkan gambaran yang jelas dapat dilihat pada gambar 2.11 berikut ini :



**Gambar 2.11** Selektivitas Sistem Pengaman

Pada rangkaian diatas bila terjadi gangguan dititik F (simbol halilantar-*short circuit*), koordinasi pengaman dibuat sedemikian rupa sehingga hanya CB3 yang lepas sedangkan CB1, CB2, dan CB yang lainnya tidak boleh lepas.

### c. Kepekaan (sensitivitas)

Pada prinsipnya rele harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan pengamanannya meskipun dalam kondisi yang memberikan rangsangan yang minimum. Kepekaan rele diartikan sebagai kemampuan merespon bila kondisi kerja cenderung menyimpang dari kondisi kerja normal. Bila suatu kondisi kerja normal tiba-tiba mengalami gangguan, maka sistem pengaman harus cepat tanggap (peka). Sensitifitas dapat dituliskan dengan persamaan faktor sensitif  $K_s$ , yang merupakan perbandingan antara arus hubung singkat minimum dan arus pick up. [7]

$$K_s = \frac{I_{scmin}}{I_{pp}} \quad (2.10)$$

dimana :

$I_{sc\ min}$  = arus hubung singkat minimum.

$I_{pp}$  = arus pick up (arus kerja) primer dari pengaman.

Dari beberapa referensi buku proteksi diperoleh nilai daripada konstanta  $K_s$  adalah 0,8.

### d. Keandalan (reliability)

Terdapat tiga aspek penting dalam keandalan pengaman yaitu:

#### i. Dependability

yaitu tingkat bekerjanya (keandalan kemampuan bekerjanya). Pada prinsipnya rele pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu) dan tidak boleh gagal bekerja. Sehingga dependabilitynya harus tinggi.

#### ii. Security

yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah bekerja (keandalan untuk tidak salah kerja). Kondisi salah kerja adalah kondisi dimana rele bekerja pada saat seharusnya rele tidak bekerja, misalnya karena lokasi gangguan di luar kawasan pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan. Salah kerja mengakibatkan pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi.

*iii. Availability*

yaitu perbandingan antara waktu dimana rele pengaman dalam keadaan siap kerja dan waktu total operasinya.

**e. Ekonomis**

Setelah dari sisi teknis, sekarang diperhitungkan sisi ekonomisnya. Dalam pemilihan rele harus disesuaikan dengan harga peralatan yang diamankan sehingga harga rela pengaman yang digunakan tidak melebihi harga peralatan yang diamankan.

**2.11 Rele Arus Lebih (*Overcurrent Relay*)**

Pada dasarnya rele arus lebih berfungsi sebagai pengaman gangguan hubung singkat, tetapi dalam beberapa hal dapat berfungsi sebagai pengaman beban lebih.

**2.11.1 Prinsip Kerja Rele Arus Lebih**

Rele arus lebih merupakan suatu jenis rele yang bekerja berdasarkan besarnya arus masukan, dan apabila besarnya arus masukan melebihi suatu harga tertentu yang dapat diatur ( $I_p$ ) maka rele arus lebih bekerja. Dimana  $I_p$  merupakan arus kerja yang dinyatakan menurut gulungan sekunder dari trafo arus (CT). Bila suatu gangguan terjadi didalam daerah perlindungan rele, besarnya arus gangguan  $I_f$  yang juga dinyatakan terhadap gulungan sekunder CT juga. Rele akan bekerja apabila memenuhi keadaan sebagai berikut :

$I_f > I_p$	rele bekerja	( <i>trip</i> )
$I_f < I_p$	tidak bekerja	( <i>block</i> )

## **BAB 3**

### **SISTEM KELISTRIKAN PT. PINDO DELI**

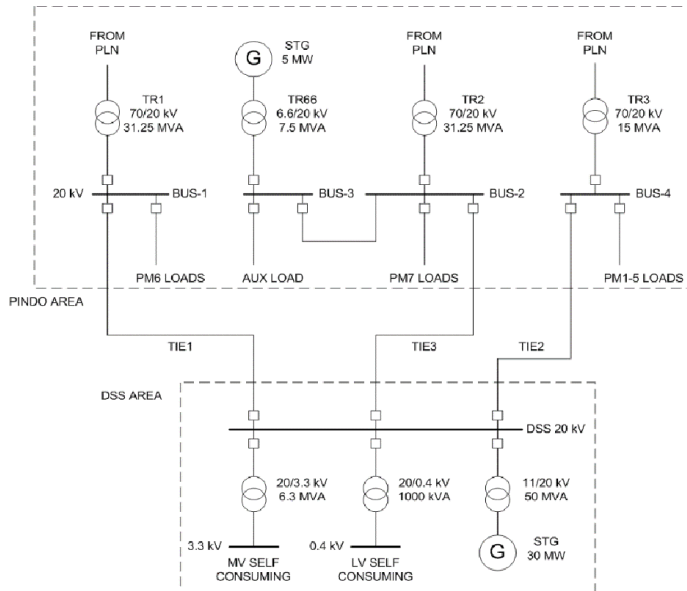
#### **3.1 Sistem Jaringan Tenaga Listrik di PT. Pindo Deli**

Sistem Distribusi pada PT Pindo Deli adalah sistem radial. Awalnya PT Pindo Deli mempunyai daya sebesar 70kV yang berasal dari PLN. Kemudian sistem kelistrikan PT Pindo Deli diperbesar dengan tambahan daya dari PT DSS sebesar 30 MW dan 5 MW. Pengintegrasian tersebut mengakibatkan arus hubung singkat bertambah di setiap switchgearnya.

Arus hubung singkat tertinggi pada sistem diperoleh pada saat pembangkitan maksimum. Pembangkitan maksimum adalah ketika jumlah generator/sumber yang terhubung ke jaringan 20kV paling banyak. Tabel 3.1 adalah kapasitas dari generator. Sesuai dengan pola operasinya, sistem integrasi di plant PT. DSS dan PT. Pindo Deli, arus hubung singkat paling tinggi diperoleh ketika dua STG dan satu transformator 31.25 MVA terhubung ke jaringan 20-kV yaitu pada bus 1. Gambar 3.1 menunjukkan konfigurasi sistem kelistrikan PT Pindo Deli dengan PT DSS.

**Tabel 3.1** Data kapasitas dan impedansi sub-transien generator

<b>Generator</b>	<b>Lokasi</b>	<b>Kapasitas (MVA)</b>	<b>KV</b>	<b>Xd"</b>
STG_EMG 5 MW	PINDO DELI	5,882	6,6	12%
STG 30 MW	PT DSS	37,5	11	11,84%



**Gambar 3.1** Single line diagram PT Pindo Deli (disederhanakan)

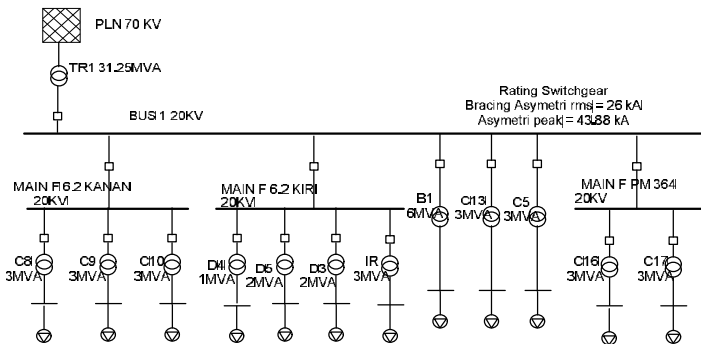
### 3.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik di PT. Pindo Deli

Pada sistem kelistrikan PT Pindo Deli yang terintegrasi dengan PT DSS, daya dari STG 30-MW disalurkan ke beban di PT. Pindo Deli melalui saluran distribusi 20-kV yaitu Bus DSS Main. Bus utama pada jaringan distribusi sistem tenaga listrik PT Pindo Deli dan PT DSS menggunakan level tegangan 20 kV. Sehingga level tegangan dari tiap Generator akan dinaikkan menjadi 20 kV oleh transformator step up. Pendistribusian daya listrik dari Bus utama ke beban pada substation - substation menggunakan transformer dari 20/0,4-kV. Untuk beban pemakaian sendiri PT DSS menggunakan transformator 20/3,3-kV.

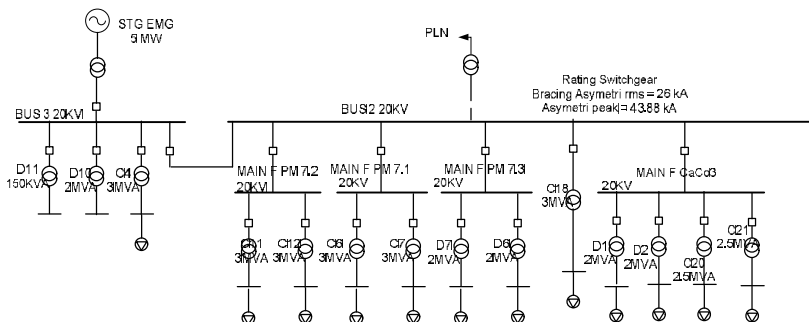


### 3.2.1 Data Beban di PT Pindo Deli

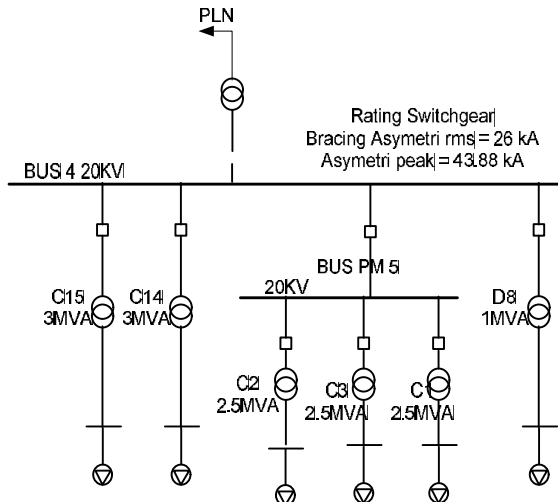
Beban-beban di PT. Pindo Deli dibagi menjadi tiga kelompok sesuai dengan jumlah substation yakni PM6, PM7 dan PM1-5. Gambar 3.2 s/d gambar 3.4 menunjukkan substation tersebut. Tabel 3.1 memperlihatkan kebutuhan daya masing-masing kelompok beban yang diperoleh dari data operasi dilapangan. Selain beban di PT. Pindo Deli, terdapat beban untuk mendukung sistem internal pembangkitan di PT. DSS yang dikelompokkan sebagai beban motor-motor tegangan menengah 3,3-kV dan beban tegangan rendah 0.4-kV. Daya motor tegangan menengah ditabulasikan pada Tabel 3.2 yang menunjukkan daya rating dan operasinya.



**Gambar 3.2** Single line diagram PM 6 atau BUS 1



**Gambar 3.3** Single line diagram substation PM 7 atau BUS 2

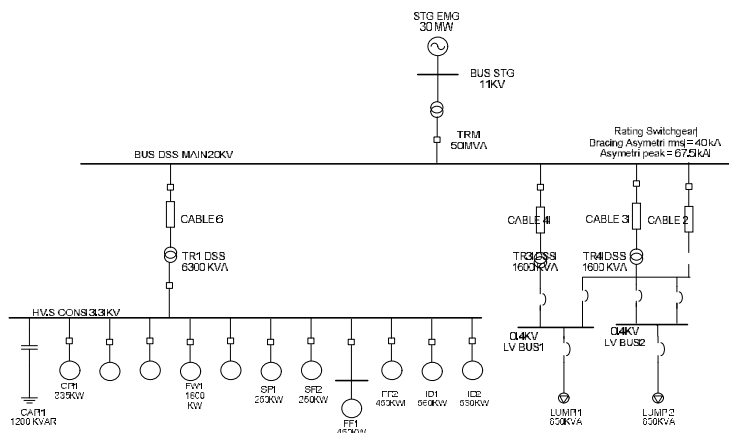


**Gambar 3.4** Single line diagram substasion PM 1-5 atau BUS 4

**Tabel 3.2** Kelompok dan kebutuhan daya beban di PT. Pindo Deli.

Transformer	Substation	Power ( kW )
TR-1	6.1 3000 (STOCK 6 (3.3kV))	1341
	6.1 6000 ( STOCK 6 )	2683
	6.2 KIRI ( OMC 2 )	2466
	6.2 KANAN ( PM 6 )	3014
	6.3 ( COLOR KITCHEN & KOMPRESOR )	914
	PM 3/4 and OMC-1	3104
	SUB TOTAL	13522
TR-2	7.1 ( STOCK 7 )	3346
	7.2 ( PM 7 )	3544
	7.3 ( FINISHING 6 / 7 )	1768
	DEINKING	1738
	CaCO3 1, 2, and 3	3048
	TOWER TANK & MESS	1110
	SUBTOTAL	14554
TR-3	STOCK 3/4	1434
	PM 1/2	1663
	PM 5	2651
	WATER SUPPLY ( FWT GEROWONG )	209
	SUBTOTAL	5957
TOTAL		34032

Selain beban di PT. Pindo Deli, terdapat beban untuk mendukung sistem internal pembangkitan di PT. DSS yang dikelompokkan sebagai beban motor-motor tegangan menengah 3.3-kV dan beban tegangan rendah 0.4-kV. Gambar 3.5 dan gambar 3.6 adalah single line diagram dari PT DSS. Tabel 3.2 yang menunjukkan daya rating dan operasi motor tegangan menengah



**Gambar 3.5** Single line diagram PT DSS

**Tabel 3.3.** Motor 3.3-kV penunjang sistem internal STG 30-MW PT.

ID	Description	Rated kW	Operating kW
FW1	MOTOR FEED WATER_1	1600	1309.67
FW2	MOTOR FEED WATER_2	1600	0
ID1	MOTOR INDUCED DRAFT FAN_1	560	422.22
ID2	MOTOR INDUCED DRAFT FAN_2	560	413.39
FF1	MOTOR FIRST FAN_1	450	307.66
FF2	MOTOR FIRST FAN_2	450	307.72
SF1	MOTOR SECOND FAN_1	250	102.52
SF2	MOTOR SECOND FAN_2	250	90.7
CP1	MOTOR CIRCULATING_1	335	202.51
CP2	MOTOR CIRCULATING_2	335	0
CP3	MOTOR CIRCULATING_3	335	0
<b>Total</b>			<b>3156</b>

Halaman Ini sengaja dikosongkan

## BAB 4

### SIMULASI DAN ANALISA

#### 4.1 Hasil Simulasi Dengan *Software ETAP (Existing)*

Simulasi pada *software ETAP* menggunakan perhitungan yang telah ditetapkan dalam standar IEEE 1584-2002. Pada sub kali ini, akan ditampilkan hasil simulasi energi busur api dengan kondisi *existing* yaitu kondisi yang sesuai dengan sistem kelistrikan yang ada pada PT. Pindo Deli pada bus 1 dan bus 2 masih memiliki *working distance* (D) sebesar 457,2 mm. Berikut tabel yang menunjukkan insiden energi yang tercipta pada kondisi tersebut:

**Tabel 4.1** Data Energi Busur Api Hasil Simulasi *ETAP* pada Tiap Bus dengan D=457,2 mm pada Bus 1 dan Bus 2

Bus Name	Bus Arcing Current (kA)	V (kV)	Bus Bolted Fault Current (kA)	FCT (s)	Working Distance (cm)	Incident Energy ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )	Category
BUS1	18,44	20	18,44	0,179	45,72	161,57	Exceeds
BUS2	16,68	20	16,68	0,183	45,72	149,39	Exceeds
DSS MAIN	18,14	20	18,14	0,076	91,44	16,89	Category 3
MAIN F.62 KANA N	18,44	20	18,44	0,125	91,44	28,18	Category 4
MAIN F.62 KIRI	18,44	20	18,44	0,125	91,44	28,18	Category 4
MAIN F CACO3	16,68	20	16,68	0,125	91,44	25,48	Category 4
MAIN F PM 7.1	16,68	20	16,68	0,125	914,4	25,48	Category 4

Sedangkan menurut standar IEEE 1584-2002 *working distance* (D) pada level tegangan > 15 kV yang harus digunakan adalah sebesar 914,4 mm. Berikut adalah hasil insiden energi yang terjadi pada kondisi ini :

**Tabel 4.2**Data Energi Busur Api Hasil Simulasi *ETAP* pada Tiap Bus dengan D=914,4 mm pada Bus 1 dan Bus 2

Bus Name	Bus Arcing Current (kA)	V (kV)	Bus Bolted Fault Current (kA)	FCT (s)	Working Distance (cm)	Incident Energy (cal/cm <sup>2</sup> )	Category
BUS1	18,44	20	18,44	0,179	91,44	40,39	Exceeds
BUS2	16,68	20	16,68	0,183	91,44	37,35	Category 4
DSS MAIN	18,14	20	18,14	0,076	91,44	16,89	Category 3
MAIN F.62 KANAN	18,44	20	18,44	0,125	91,44	28,18	Category 4
MAIN F.62 KIRI	18,44	20	18,44	0,125	91,44	28,18	Category 4
MAIN F CACO3	16,68	20	16,68	0,125	91,44	25,48	Category 4
MAIN F PM 7.1	16,68	20	16,68	0,125	91,44	25,48	Category 4

Dari hasil simulasi di atas,terdapat insiden energi yang yang berbeda.Hal ini menunjukkan bahwa perubahan besarnya *working distance* (D) pada bus 1 dan bus 2 berpengaruh terhadap insiden energi yang terjadi. Semakin jauh jarak dari *working distance* (D), maka semakin kecil insiden energi yang dihasilkan pada bus tersebut.insiden energy dapat di hitung dengan rumus sebagai berikut:

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Ibf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (1)$$

Rumus diatas menunjukkan bahwa *working distance* (D) berbanding terbalik dengan besarnya insiden energi yang dihasilkan.

## 4.2 Hasil Simulasi Dengan Menggunakan *Software ETAP (Reseting)*

Hasil simulasi pada kondisi *resetting*, dimana rele dari setiap bus telah dilakukan *setting* koordinasi agar *circuit breaker* yang terbuka sesuai dengan letak terjadinya gangguan hubung singkat, sehingga

sistem kelistrikan tetap bekerja seefektif pada saat terjadi gangguan. Tabel dibawah ini menunjukan insiden energi yang terjadi pada kondisi *resetting* :

**Tabel 4.3**Data Energi Busur Api Hasil Simulasi *ETAP* pada Tiap-Tiap Bus Kondisi *Resetting*

Bus Name	Bus Arcing Current (kA)	V (kV)	Bus Bolted Fault Current (kA)	FCT (s)	Working Distance (cm)	Incident Energy (cal/cm <sup>2</sup> )	Category
BUS1	18,44	20	18,44	0,6	91,44	135,57	Exceeds
BUS2	16,68	20	16,68	0,689	91,44	141,24	Exceeds
DSS MAIN	18,14	20	18,14	0,76	91,44	168,9	Exceeds
MAIN F.62 KANA N	18,44	20	18,44	0,4	91,44	90,38	Exceeds
MAIN F.62 KIRI	18,44	20	18,44	0,4	91,44	90,38	Exceeds
MAIN F CACO3	16,68	20	16,68	0,4	91,44	81,75	Exceeds
MAIN F PM 7.1	16,68	20	16,68	0,4	91,44	81,75	Exceeds

#### 4.2.1 Perhitungan Energi Busur Api ( *Reseting* )

**Bus 1 ( I<sub>bf</sub> = 18,44 kA )**

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times 18,44 \text{ kA} \times \frac{0,6}{914,4^2}$$

$$E = 566.87 \text{ j/cm}^2 \rightarrow 566.87 \times 0.24 = 136,05 \text{ cal/cm}^2$$

**Bus 2 ( I<sub>bf</sub> = 16,68kA )**

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times 16,68 \text{ kA} \times \frac{0,689}{914,4^2}$$

$$E = 588.8 \text{ j/cm}^2 \rightarrow 588.8 \times 0.24 = 141,3 \text{ cal/cm}^2$$

**Bus DSS MAIN (  $I_{bf}= 18,14\text{kA}$  )**

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times 18,14 \text{ kA} \times \frac{0,76}{914,4^2}$$

$$E = 706.36 \text{ j/cm}^2 \rightarrow 706.36 \times 0.24 = \mathbf{169,5 \text{ cal/cm}^2}$$

**Bus MAIN F 6.2 KANAN (  $I_{bf}= 18,44\text{kA}$  )**

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times 18,44 \text{ kA} \times \frac{0,4}{914,4^2}$$

$$E = 377.9 \text{ j/cm}^2 \rightarrow 377.9 \times 0.24 = \mathbf{90,7 \text{ cal/cm}^2}$$

**Bus MAIN F 6.2 Kiri (  $I_{bf}= 18,44\text{kA}$  )**

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times 18,44 \text{ kA} \times \frac{0,4}{914,4^2}$$

$$E = 377.9 \text{ j/cm}^2 \rightarrow 377.9 \times 0.24 = \mathbf{90,7 \text{ cal/cm}^2}$$

**Bus MAIN F CACO3 (  $I_{bf}= 16,68\text{kA}$  )**

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times 16,68 \text{ kA} \times \frac{0,4}{914,4^2}$$

$$E = 341.8 \text{ j/cm}^2 \rightarrow 341.8 \times 0.24 = \mathbf{82,04 \text{ cal/cm}^2}$$

**Bus MAIN F PM 7.1 (  $I_{bf}= 16,68\text{kA}$  )**

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times 16,68 \text{ kA} \times \frac{0,4}{914,4^2}$$

$$E = 341.8 \text{ j/cm}^2 \rightarrow 341.8 \times 0.24 = \mathbf{82,04 \text{ cal/cm}^2}$$

Pada bus main F 6.2 kanan dan bus main F 6.2 kiri menghasilkan insiden energi yang sama, hal ini juga terjadi pada bus main F caco3 dan bus main F PM 7.1 yang memiliki insiden energi yang sama. Hal ini terjadi karena antara kedua bus itu melewati saluran yang sama dan posisi bus terjadinya gangguan juga sama sehingga parameter impedansi (pu) menghasilkan besaran yang sama, hal ini yang membuat besarnya  $I_{bf}$  atau yang lebih dikenal dengan arus gangguan hubung singkat menghasilkan besaran arus yang sama, pada bus main F 6.2 kanan dan bus main F 6.2 kiri menghasilkan  $I_{bf} = 18,44 \text{ kA}$  dan pada bus main F



caco3 dan bus main F PM 7.1 menghasilkan  $I_{bf} = 16,68$  kA. Selain itu besarnya energi busur api yang dihasilkan antara simulasi maupun perhitungan memiliki nilai yang mendekati, hal ini menunjukkan bahwa besaran energi busur api yang didapat telah sesuai.

#### 4.2.2 Perhitungan Energi Busur Api (*Reseting*) dengan Metode *Time Domain*

Pada perhitungan energi busur api dengan metode *time domain* terdapat beberapa tambahan yang memperhatikan beberapa faktor diantaranya kontribusi arus hubung singkat motor induksi maupun sinkron berdasarkan besar kapasitas motor tersebut, waktu bekerjanya pemutus (*fault clearing time*) serta pembangkit maupun penyulang lain (*grid/utility*). Metode ini merepresentasikan parameter parameter diatas dalam domain waktu (*time domain*), dimana *time domain* tersebut akan mempengaruhi besar insiden energi busur api yang terjadi berdasarkan jumlah dan besar kapasitas motor khususnya pada level tegangan menengah. Secara garis besar terdapat 3 domain waktu diantaranya yaitu  $I_{sc}$   $\frac{1}{2}$  cycle (0-0,035s),  $I_{sc}$  1,5-4 cycle (0,035-0,067s) dan  $I_{sc}$  30 cycle (0,067-0,8s). Berikut perhitungan energi busur api (incident energy) dengan metode *time domain* :

##### Bus 1(FCT=0,6 s)

- $\frac{1}{2}$  cycle (0 – 0,01 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{sc} \text{ contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (7,637\text{kA}+9,187\text{kA} +7,637\text{kA} +0,389\text{kA} +0,38\text{kA} +0,305\text{kA} +0,342\text{kA} +0,121\text{kA} +0,173\text{kA}) \times \left(\frac{0,01}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{3,218 \text{ cal/cm}^2}$$

- $\frac{1}{2}$  cycle ( 0,01-0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{sc} \text{ contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (7,637\text{kA}+9,187\text{kA} +0\text{kA} +0,389\text{kA} +0,38\text{kA} +0,305\text{kA} +0,342\text{kA} +0,121\text{kA} +0,173\text{kA}) \times \left(\frac{0,025}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{5,697 \text{ cal/cm}^2}$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{sc} \text{ cotribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (6,069\text{kA}+9,187\text{kA} +0\text{kA} +0,171\text{kA} +0,161\text{kA}$$

$$+0,127\text{kA} +0,148\text{kA} +0,051\text{kA} +0,075\text{kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{6,2916 \text{ cal/cm}^2}$$

- 30 cycle (0.067-0.6 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (6,258\text{kA} + 9,187\text{kA} + 0\text{kA} + 0,389\text{kA} + 0,342\text{kA} + 0,173\text{kA}) \times \left(\frac{0,533}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{107,15 \text{ cal/cm}^2}$$

Energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* yang terjadi pada bus 1

$$= 3,218 \text{ cal/cm}^2 + 5,697 \text{ cal/cm}^2 + 6,2916 \text{ cal/cm}^2 + 107,15 \text{ cal/cm}^2 = \mathbf{122,36 \text{ cal/cm}^2}$$

## Bus 2(FCT=0,689 s)

- ½ cycle (0 – 0,01 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,09 \text{ kA} + 0,992\text{kA} + 14,09\text{kA} + 0,398\text{kA} + 0,414 \text{ kA} + 0,225 \text{ kA} + 0,216\text{kA} + 0,382\text{kA}) \times \left(\frac{0,01}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{3,788 \text{ cal/cm}^2}$$

- ½ cycle (0,01-0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,09 \text{ kA} + 0,992\text{kA} + 0\text{kA} + 0,398\text{kA} + 0,414 \text{ kA} + 0,225 \text{ kA} + 0,216\text{kA} + 0,382\text{kA}) \times \left(\frac{0,025}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{5,139 \text{ cal/cm}^2}$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (12,795 \text{ kA} + 0,913\text{kA} + 0\text{kA} + 0,175\text{kA} + 0,183 \text{ kA} + 0,096 \text{ kA} + 0,095\text{kA} + 0,161\text{kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{5,673 \text{ cal/cm}^2}$$

- 30 cycle (0,067-0,689 s)

$$\begin{aligned}
E &= 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right) \\
E &= 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (12,881 \text{ kA} + 0,856 \text{ kA} + 0 \text{ kA} + 0,398 \text{ kA} + 0,414 \\
&\text{kA} + 0,216 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,62}{914,4^2}\right) \\
E &= \mathbf{112,9 \text{ cal/cm}^2}
\end{aligned}$$

Energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* yang terjadi pada bus 2  
 $= 3,788 \text{ cal/cm}^2 + 5,139 \text{ cal/cm}^2 + 5,673 \text{ cal/cm}^2 + 112,9 \text{ cal/cm}^2 =$   
**127,5 cal/cm<sup>2</sup>**

#### **Bus DSS MAIN(FCT=0,76 s)**

- ½ cycle (0 – 0,035 s)
$$\begin{aligned}
E &= 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right) \\
E &= 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (2,557 \text{ kA} + 4,002 \text{ kA} + 0,816 \text{ kA} + 10,074 \text{ kA} \\
&+ 0,652 \text{ kA} + 0,055 \text{ kA} + 0,055 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right) \\
E &= \mathbf{7,8377 \text{ cal/cm}^2}
\end{aligned}$$
- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)
$$\begin{aligned}
E &= 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right) \\
E &= 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (1,584 \text{ kA} + 4,002 \text{ kA} + 0,351 \text{ kA} + 9,261 \text{ kA} \\
&+ 0,383 \text{ kA} + 0,024 \text{ kA} + 0,024 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right) \\
E &= \mathbf{6,1499 \text{ cal/cm}^2}
\end{aligned}$$
- 30 cycle (0,067-0,36 s)
$$\begin{aligned}
E &= 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right) \\
E &= 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (1,837 \text{ kA} + 4,002 \text{ kA} + 0,429 \text{ kA} + 9,41 \text{ kA} \\
&+ 0,308 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,293}{914,4^2}\right) \\
E &= \mathbf{57,596 \text{ cal/cm}^2}
\end{aligned}$$
- 30 cycle (0,36-0,56 s)
$$\begin{aligned}
E &= 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right) \\
E &= 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (1,837 \text{ kA} + 4,002 \text{ kA} + 0,429 \text{ kA} + 0 \text{ kA} + 0,308 \\
&\text{kA}) \times \left(\frac{0,2}{914,4^2}\right) \\
E &= \mathbf{16,173 \text{ cal/cm}^2}
\end{aligned}$$

- 30 cycle (0,56-0,76 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (0 \text{ kA} + 4,002 \text{ kA} + 0,429 \text{ kA} + 0 \text{ kA} + 0,308 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,2}{914,4^2}\right)$$

$$E = 11,655 \text{ cal/cm}^2$$

Energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* yang terjadi pada bus DSS MAIN

$$= 7,8377 \text{ cal/cm}^2 + 6,1499 \text{ cal/cm}^2 + 57,596 \text{ cal/cm}^2 + 16,173 \text{ cal/cm}^2 + 11,655 \text{ cal/cm}^2 = 99,41 \text{ cal/cm}^2$$

#### **Bus MAIN F.62 KANAN(FCT=0,4 s)**

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (18,076 \text{ kA} + 0,124 \text{ kA} + 0,133 \text{ kA} + 0,124 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = 7,9436 \text{ cal/cm}^2$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (15,789 \text{ kA} + 0,052 \text{ kA} + 0,056 \text{ kA} + 0,052 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = 6,2758 \text{ cal/cm}^2$$

- 30 cycle (0,067-0,4 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (16,301 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,333}{914,4^2}\right)$$

$$E = 66,7493 \text{ cal/cm}^2$$

Energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* yang terjadi pada bus MAIN F.62 KANAN

$$= 7,9436 \text{ cal/cm}^2 + 6,2758 \text{ cal/cm}^2 + 66,7493 \text{ cal/cm}^2 = 80,96874 \text{ cal/cm}^2$$

#### **Bus MAIN F.62 KIRI(FCT=0,4 s)**

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (0,078\text{kA} + 18,149\text{kA} + 0,076\text{kA} + 0,076\text{kA} + 0,076 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{7,9427 \text{ cal/cm}^2}$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (0,032 \text{ kA} + 15,822\text{kA} + 0,032\text{kA} + 0,032\text{kA} + 0,032 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{6,27623 \text{ cal/cm}^2}$$

- 30 cycle (0,067-0,4 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (0 \text{ kA} + 16,301 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,333}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{66,7493 \text{ cal/cm}^2}$$

Energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* yang terjadi pada bus MAIN F.62 KIRI

$$= \mathbf{7,9427 \text{ cal/cm}^2} + \mathbf{6,27623 \text{ cal/cm}^2} + \mathbf{66,7493 \text{ cal/cm}^2} = \mathbf{80,96827 \text{ cal/cm}^2}$$

#### **Bus MAIN F CAC03(FCT=0,4 s)**

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (16,308 \text{ kA} + 0,101\text{kA} + 0,093\text{kA} + 0,094\text{kA} + 0,094 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{7,1831 \text{ cal/cm}^2}$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,237 \text{ kA} + 0,043\text{kA} + 0,039\text{kA} + 0,04\text{kA} + 0,04 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{5,6659 \text{ cal/cm}^2}$$

- 30 cycle (0,067-0,4 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,737 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,333}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{60,345 \text{ cal/cm}^2}$$

Energi busur api (*incident energy*) dengan *metode time domain* yang terjadi pada bus MAIN F CACO3

$$= 7,1831 \text{ cal/cm}^2 + 5,6659 \text{ cal/cm}^2 + 60,345 \text{ cal/cm}^2 = \mathbf{73,194 \text{ cal/cm}^2}$$

#### **Bus MAIN F PM 7.1(FCT=0,4 s)**

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (16,275 \text{ kA} + 0,214 \text{ kA} + 0,2 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{7,1826 \text{ cal/cm}^2}$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,215 \text{ kA} + 0,095 \text{ kA} + 0,088 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{5,6655 \text{ cal/cm}^2}$$

- 30 cycle (0,067-0,4 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,333 \text{ kA} + 0,214 \text{ kA} + 0,2 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,333}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{60,386 \text{ cal/cm}^2}$$

Energi busur api (*incident energy*) dengan *metode time domain* yang terjadi pada bus MAIN F PM 7.1

$$= 7,1826 \text{ cal/cm}^2 + 5,6655 \text{ cal/cm}^2 + 60,386 \text{ cal/cm}^2 = \mathbf{73,234 \text{ cal/cm}^2}$$

Seperti pada bus 1 energi busur api dihitung disetiap siklus nya. Saat kondisi 0-0,035s total arus kontribusi yang mengalir 26,171 kA sehingga total energi busur api yang dihasilkan pada kondisi ini sebesar 8,915 cal/cm<sup>2</sup>. Saat kondisi 0,035-0,067s total arus kontribusi yang mengalir 15,9 kA sehingga total energi busur api yang dihasilkan pada kondisi ini sebesar 6,2916 cal/cm<sup>2</sup> dan saat kondisi 0,067-0,6 s total arus kontribusi yang mengalir 16,3 kA sehingga total energi busur api yang

dihasilkan pada kondisi ini sebesar 107,15 cal/cm<sup>2</sup>. Hasil akumulasi energi busur api ini sebesar 122,36 cal/cm<sup>2</sup>. Inilah alasan besaran energi busur api ini dapat merepresentasikan energi busur api yang sebenarnya terjadi di bus 1 sampai gangguan benar benar hilang.

### 4.3 Perhitungan Energi Busur Api dengan Metode *Time Domain* Setelah Ditambah Rele Diferensial

Kendala yang dihadapi adalah setelah dilakukan *resetting* rele dengan mengatur waktu dari pembukaan *circuit breaker* agar pembukaan CB terkordinir sesuai dengan letak terjadinya gangguan adalah besarnya besarnya energi busur api yang yang tercipta akibat adanya gangguan hubung singkat yang masih diatas *category* 4 yaitu diatas 40 cal/cm<sup>2</sup> hal ini menyebabkan tidak ada jenis dan kualitas dari *personal protective equipment* (PPE) yang cocok untuk kondisi ini karena berada diluar *standard* dari NFPA 70E. Sehingga dibutuhkan rele yang dapat bekerja dengan sangat cepat ketika terjadi gangguan hubung singkat yaitu dengan menambahkan rele diferensial pada sistem tenaga listrik.

Sama seperti perhitungan energi busur api dengan metode *time domain* sebelumnya, yang membedakan adalah waktu yang dibutuhkan sampai gangguan benar benar hilang adalah akan lebih cepat, karena pada rele diferensial paling lambat bekerja sekurang kurangnya 3 cycle. Dibawah ini merupakan perhitungan besarnya energi busur api (*incident energy*) yang terjadi :

#### Bus 1(FCT=0,16 s)

- ½ cycle (0 – 0,01 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{sc} \text{ contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (7,637\text{kA} + 9,187\text{kA} + 7,637\text{kA} + 0,389\text{kA} + 0,38\text{kA} + 0,305\text{kA} + 0,342\text{kA} + 0,121\text{kA} + 0,173\text{kA}) \times \left(\frac{0,01}{914,4^2}\right)$$

$$E = 3,218 \text{ cal/cm}^2$$

- ½ cycle ( 0,01-0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times I_{sc} \text{ contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (7,637\text{kA} + 9,187\text{kA} + 0\text{kA} + 0,389\text{kA} + 0,38\text{kA} + 0,305\text{kA} + 0,342\text{kA} + 0,121\text{kA} + 0,173\text{kA}) \times \left(\frac{0,025}{914,4^2}\right)$$

$$E = 5,697 \text{ cal/cm}^2$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (6,069\text{kA} + 9,187\text{kA} + 0\text{kA} + 0,171\text{kA} + 0,161\text{kA} + 0,127\text{kA} + 0,148\text{kA} + 0,051\text{kA} + 0,075\text{kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{6,2916 \text{ cal/cm}^2}$$

- 30 cycle (0,067-0,16 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (6,258\text{kA} + 9,187\text{kA} + 0\text{kA} + 0,389\text{kA} + 0,342\text{kA} + 0,173\text{kA}) \times \left(\frac{0,093}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{18,69 \text{ cal/cm}^2}$$

Setelah menambahkan rele diferensial, didapatkan energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* pada bus 1

$$= 3,218 \text{ cal/cm}^2 + 5,697 \text{ cal/cm}^2 + 6,2916 \text{ cal/cm}^2 + 18,69 \text{ cal/cm}^2 = \mathbf{33,9 \text{ cal/cm}^2}$$

## Bus 2(FCT=0,16 s)

- ½ cycle (0 – 0,01 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,09 \text{ kA} + 0,992\text{kA} + 14,09\text{kA} + 0,398\text{kA} + 0,414 \text{ kA} + 0,225 \text{ kA} + 0,216\text{kA} + 0,382\text{kA}) \times \left(\frac{0,01}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{3,788 \text{ cal/cm}^2}$$

- ½ cycle (0,01-0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,09 \text{ kA} + 0,992\text{kA} + 0\text{kA} + 0,398\text{kA} + 0,414 \text{ kA} + 0,225 \text{ kA} + 0,216\text{kA} + 0,382\text{kA}) \times \left(\frac{0,025}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{5,139 \text{ cal/cm}^2}$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (12,795 \text{ kA} + 0,913\text{kA} + 0\text{kA} + 0,175\text{kA} + 0,183 \text{ kA} + 0,096 \text{ kA} + 0,095\text{kA} + 0,161\text{kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$



$$E = 5,673 \text{ cal/cm}^2$$

- 30 cycle (0,067-0,16 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (12,881 \text{ kA} + 0,856 \text{ kA} + 0 \text{ kA} + 0,398 \text{ kA} + 0,414 \text{ kA} + 0,216 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,093}{914,4^2}\right)$$

$$E = 16,88 \text{ cal/cm}^2$$

Setelah menambahkan rele diferensial, didapatkan energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* pada bus 2

$$= 3,788 \text{ cal/cm}^2 + 5,139 \text{ cal/cm}^2 + 5,673 \text{ cal/cm}^2 + 16,88 \text{ cal/cm}^2 = 31,48 \text{ cal/cm}^2$$

#### Bus DSS MAIN(FCT=0,16 s)

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (2,557 \text{ kA} + 4,002 \text{ kA} + 0,816 \text{ kA} + 10,074 \text{ kA} + 0,652 \text{ kA} + 0,055 \text{ kA} + 0,055 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = 7,8377 \text{ cal/cm}^2$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (1,584 \text{ kA} + 4,002 \text{ kA} + 0,351 \text{ kA} + 9,261 \text{ kA} + 0,383 \text{ kA} + 0,024 \text{ kA} + 0,024 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = 6,1499 \text{ cal/cm}^2$$

- 30 cycle (0,067-0,12 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (1,837 \text{ kA} + 4,002 \text{ kA} + 0,429 \text{ kA} + 9,41 \text{ kA} + 0,308 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,053}{914,4^2}\right)$$

$$E = 10,418 \text{ cal/cm}^2$$

- 30 cycle (0,12-0,16 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (1,837 \text{ kA} + 0 \text{ kA} + 0,429 \text{ kA} + 9,41 \text{ kA} + 0,308$$

$$\text{kA}) \times \left(\frac{0,04}{914,4^2}\right)$$

$$E = 5,89 \text{ cal/cm}^2$$

Setelah menambahkan rele diferensial, didapatkan energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* pada bus DSS MAIN  
 $= 7,8377 \text{ cal/cm}^2 + 6,1499 \text{ cal/cm}^2 + 10,418 \text{ cal/cm}^2 + 5,89 \text{ cal/cm}^2 =$   
**30,3<sup>cal</sup>/cm<sup>2</sup>**

#### **Bus MAIN F.62 KANAN(FCT=0,16 s)**

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (18,076 \text{ kA} + 0,124 \text{ kA} + 0,133 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = 7,89 \text{ cal/cm}^2$$

- 1.5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (15,789 \text{ kA} + 0,052 \text{ kA} + 0,056 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = 6,255 \text{ cal/cm}^2$$

- 30 cycle (0,067-0,16 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (16,301 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,093}{914,4^2}\right)$$

$$E = 18,64 \text{ cal/cm}^2$$

Setelah menambahkan rele diferensial, didapatkan energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* pada bus MAIN F.62 KANAN

$$= 7,89 \text{ cal/cm}^2 + 6,255 \text{ cal/cm}^2 + 18,64 \text{ cal/cm}^2 = \mathbf{32,78^{\text{cal}}/\text{cm}^2}$$

#### **Bus MAIN F.62 KIRI(FCT=0,16 s)**

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{dt}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (0,078 \text{ kA} + 18,149 \text{ kA} + 0,076 \text{ kA} + 0,076 \text{ kA} + 0,076 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = 7,9427 \text{ cal/cm}^2$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (0,032 \text{ kA} + 15,822 \text{ kA} + 0,032 \text{ kA} + 0,032 \text{ kA} + 0,032 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{6,27623 \text{ cal/cm}^2}$$

- 30 cycle (0,067-0,4 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (0 \text{ kA} + 16,301 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,093}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{18,64 \text{ cal/cm}^2}$$

Setelah menambahkan rele diferensial, didapatkan energi busur api (*incident energy*) dengan metode time domain pada bus MAIN F.62 KIRI

$$= \mathbf{7,9427 \text{ cal/cm}^2} + \mathbf{6,27623 \text{ cal/cm}^2} + \mathbf{18,64 \text{ cal/cm}^2} = \mathbf{32,86^{cal}/cm^2}$$

#### **Bus MAIN F CAC03(FCT=0,16 s)**

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (16,308 \text{ kA} + 0,101 \text{ kA} + 0,093 \text{ kA} + 0,094 \text{ kA} + 0,094 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{7,1831 \text{ cal/cm}^2}$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,237 \text{ kA} + 0,043 \text{ kA} + 0,039 \text{ kA} + 0,04 \text{ kA} + 0,04 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{5,6659 \text{ cal/cm}^2}$$

- 30 cycle (0,067-0,16 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,737 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,093}{914,4^2}\right)$$

$$E = \mathbf{16,85 \text{ cal/cm}^2}$$

Setelah menambahkan rele diferensial, didapat energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* pada bus MAIN F CACO3

$$= 7,1831 \text{ cal/cm}^2 + 5,6659 \text{ cal/cm}^2 + 16,85 \text{ cal/cm}^2 = 29,7^{\text{cal}}/\text{cm}^2$$

#### Bus MAIN F PM 7.1(FCT=0,16 s)

- ½ cycle (0 – 0,035 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (16,275 \text{ kA} + 0,214 \text{ kA} + 0,2 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,035}{914,4^2}\right)$$

$$E = 7,1826 \text{ cal/cm}^2$$

- 1,5-4 cycle (0,035-0,067 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,215 \text{ kA} + 0,095 \text{ kA} + 0,088 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,032}{914,4^2}\right)$$

$$E = 5,6655 \text{ cal/cm}^2$$

- 30 cycle (0,067-0,16 s)

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{ V} \times \text{Isc contribution} \times \left(\frac{\Delta t}{D^2}\right)$$

$$E = 2,142 \times 10^6 \times 20 \text{ kV} \times (14,333 \text{ kA} + 0,214 \text{ kA} + 0,2 \text{ kA}) \times \left(\frac{0,093}{914,4^2}\right)$$

$$E = 16,86 \text{ cal/cm}^2$$

Setelah menambahkan rele diferensial, didapatkan energi busur api (*incident energy*) dengan metode *time domain* pada bus MAIN F PM 7.1

$$= 7,1826 \text{ cal/cm}^2 + 5,6655 \text{ cal/cm}^2 + 16,86 \text{ cal/cm}^2 = 29,71^{\text{cal}}/\text{cm}^2$$

#### 4.4 Hasil Simulasi *Flash Protection Boundary* Menggunakan *Software ETAP (Existing)*

Setelah mendapatkan data energi busur api baik dari simulasi maupun perhitungan, maka data-data yang perlu diketahui juga yang berhubungan dengan energi busur api adalah besarnya *flash protection boundary* dimana dapat merepresentasikan jarak aman pekerja dari sumber *arcing* yang dapat mengakibatkan luka bakar tingkat dua. Tabel dibawah ini menunjukan besarnya *flash protection boundary* kondisi *existing* :

**Tabel 4.4** Data *Existing* Besarnya *Flash Protection Boundary* Hasil Simulasi *ETAP*

Bus Name	Bus Bolted Fault Current (kA)	V (kV)	FCT (s)	DB (m)
BUS1	18,44	20	0,179	5,32
BUS2	16,68	20	0,183	5,11
DSS MAIN	18,14	20	0,076	3,44
MAIN F.62 KANAN	18,44	20	0,125	4,44
MAIN F.62 KIRI	18,44	20	0,125	4,44
MAIN F CACO3	16,68	20	0,125	4,22
MAIN F PM 7.1	16,68	20	0,125	4,22

#### 4.5 Hasil Simulasi *Flash Protection Boundary* dengan *Software ETAP (Resetting)*

Setelah mendapatkan besarnya *flash protection boundary* dalam kondisi eksisting, dalam sub bab ini akan ditampilkan hasil simulasi besarnya *flash protection boundary* dalam kondisi *resetting*. Berikut hasil dari *flash protection boundary* yang didapat :

**Tabel 4.5** Data *Resetting* Besarnya *Flash Protection Boundary* Hasil Simulasi ETAP

Bus Name	Bus Bolted Fault Current (kA)	V (kV)	FCT (s)	DB (m)
BUS1	18,44	20	0,6	9,74
BUS2	16,68	20	0,689	9,93
DSS MAIN	18,14	20	0,76	10,87
MAIN F.62 KANAN	18,44	20	0,4	7,95
MAIN F.62 KIRI	18,44	20	0,4	7,95
MAIN F CACO3	16,68	20	0,4	7,56
MAIN F PM 7.1	16,68	20	0,4	7,56

#### 4.5.1 Perhitungan *Flash Protection Boundary*(*Resetting*)

Selain dengan simulasi, *flash protection boundary* dapat dicari melalui perhitungan. Hasil dari simulasi dan perhitungan harus sesuai. Seberapa jauh jarak minimal yang dibutuhkan pekerja supaya terhindar dari bahaya busur api merupakan tujuan dari *flash protection boundary*.. Cara untuk menentukan besarnya *flash protection boundary* yang didapat dalam kondisi time setting dari rele yang telah diatur untuk koordinasi pembukaan CB (*resetting*).Dibawah ini merupakan hasil perhitungan *flash protection boundary* dalam kondisi *resetting*:

##### Bus 1 (FCT=0,6)

$$DB = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times Ibf \times (t/EB)}$$

$$DB = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 18,44 \times (0,6/5)}$$

$$DB = 9.736 \times 10^3 \text{ mm} = 9,736 \text{ m}$$

##### Bus 2 (FCT=0,689)

$$DB = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times Ibf \times (t/EB)}$$

$$DB = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 16,68 \times (0,689/5)}$$

$$DB = 9.923 \times 10^3 \text{ mm} = 9,923 \text{ m}$$

**Bus DSS MAIN (FCT=0,76)**

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times (t/EB)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 18,14 \times (0,76/5)}$$

$$D_B = 10.868 \times 10^3 \text{ mm} = 10,868 \text{ m}$$

**Bus MAIN F.62 KANAN (FCT=0,4)**

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times (t/EB)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 18,44 \times (0,4/5)}$$

$$D_B = 7.949 \times 10^3 \text{ mm} = 7,949 \text{ m}$$

**Bus MAIN F.62 KIRI (FCT=0,4)**

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times (t/EB)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 18,44 \times (0,4/5)}$$

$$D_B = 7.949 \times 10^3 \text{ mm} = 7,949 \text{ m}$$

**Bus MAIN F CACO3 (FCT=0,4)**

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times (t/EB)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 16,68 \times (0,4/5)}$$

$$D_B = 7.5607 \times 10^3 \text{ mm} = 7,5607 \text{ m}$$

**Bus MAIN F PM 7.1 (FCT=0,4)**

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times (t/EB)}$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times 20 \times 16,68 \times (0,4/5)}$$

$$D_B = 7.5607 \times 10^3 \text{ mm} = 7,5607 \text{ m}$$

#### 4.5.2 Perhitungan *Flash Protection Boundary (Resetting)* **Hasil Dari Metode Modified**

Kali ini akan membahas besarnya *flash protection boundary* dengan memasukan parameter *incident energy* yang telah didapat dengan metode *time domain*. Dibawah ini merupakan penjelasannya:

$$IE = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times (FCT/(D^2))$$

Sedangkan

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} (FCT/EB)}$$

Sehingga besarnya *incident energy* (IE) dapat disubstitusikan ke dalam formula *flash protection boundary* (DB), dengan ini besarnya IE dikalikan dengan *work distance* kuadrat ( $D^2$ ) terlebih dahulu. Karena besarnya IE dengan metode *time domain* sebelumnya ditulis dalam satuan  $\text{cal/cm}^2$  sedangkan DB ditulis dalam  $\text{J/cm}^2$ , maka besarnya IE harus dibagi terlebih dahulu dengan 0,24 yang mana nilai 0,24 ini merupakan besarnya energi 1  $\text{J/cm}^2$  ketika di konversikan kedalam  $\text{cal/cm}^2$ . Sehingga pengaruh besarnya IE dalam *flash protection boundary* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

**Bus 1 (IE= 122,36  $\text{cal/cm}^2$ )**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((122,36 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$DB = 9,233 \times 10^3 \text{ mm} = 9,233 \text{ m}$$

**Bus 2 (IE= 127,5  $\text{cal/cm}^2$ )**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((127,5 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$DB = 9,425 \times 10^3 \text{ mm} = 9,425 \text{ m}$$

**Bus DSS MAIN (IE= 99,41  $\text{cal/cm}^2$ )**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((99,41 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$DB = 8,32 \times 10^3 \text{ mm} = 8,32 \text{ m}$$

**Bus MAIN F.62 KANAN (IE= 80,96  $\text{cal/cm}^2$ )**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((80,96 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$DB = 7,5111 \times 10^3 \text{ mm} = 7,5111 \text{ m}$$

**Bus MAIN F.62 KIRI (IE= 80,96  $\text{cal/cm}^2$ )**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((80,96 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$



$$D_B = 7,51109 \times 10^3 \text{ mm} = 7,51109 \text{ m}$$

**Bus MAIN F CaCO<sub>3</sub> (IE= 73,19 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((73,19 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 7,141 \times 10^3 \text{ mm} = 7,141 \text{ m}$$

**Bus MAIN F PM 7.1 (IE= 73,23 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((73,23 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 7,143 \times 10^3 \text{ mm} = 7,143 \text{ m}$$

#### 4.6 Perhitungan *Flash Protection Boundary* Hasil dari Metode *Time Domain* Setelah Ditambah Rele Diferensial

Dengan menambahkan rele diferensial pada sistem untuk mengurangi besarnya energi busur api (*incident energy*), penurunan besarnya energi busur api ini juga diikuti dengan perubahan dari besarnya *flash protection boundary* akan menjadi semakin kecil. Hal ini dikarenakan besarnya perubahan dari energi busur api berbanding lurus dengan besarnya perubahan dari besarnya *flash protection boundary*. Dibawah ini merupakan perhitungan *flash protection boundary* hasil dari metode *time domain* setelah ditambah rele diferensial:

**Bus 1 (IE= 33,9 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((33,9 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 4,86 \times 10^3 \text{ mm} = 4,86 \text{ m}$$

**Bus 2 (IE= 31,48 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((31,48 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 4,68 \times 10^3 \text{ mm} = 4,68 \text{ m}$$

**Bus DSS MAIN (IE= 30,3 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((30,3 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 4,59 \times 10^3 \text{ mm} = 4,59 \text{ m}$$

**Bus MAIN F.62 KANAN (IE= 32,78 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((32,78 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 4,779 \times 10^3 \text{ mm} = 4,779 \text{ m}$$

**Bus MAIN F.62 KIRI (IE= 32,86 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((32,86 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 4,78 \times 10^3 \text{ mm} = 4,78 \text{ m}$$

**Bus MAIN F CACO3 (IE= 29,7 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((29,7 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 4,549 \times 10^3 \text{ mm} = 4,549 \text{ m}$$

**Bus MAIN F PM 7.1 (IE= 29,71 cal/cm<sup>2</sup>)**

$$DB = \sqrt{((IE \times (D^2))/0,24)/EB}$$

$$DB = \sqrt{((29,71 \times (914,4^2))/0,24)/5}$$

$$D_B = 4,55 \times 10^3 \text{ mm} = 4,55 \text{ m}$$

Dari perhitungan diatas dapat di analisa semakin kecil energi busur api yang dihasilkan akibat suatu gangguan , maka jarak aman pekerja bisa lebih dekat , yaitu sekitar rata rata sejauh 4,7 m dari kemungkinan letak titik busur api terjadi.

#### **4.7 Perbandingan Antara Hasil Energi Busur Api Eksisting, *Resetting* Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 dan Energi Busur Api dengan Metode *Time Domain*.**

Tabel di bawah ini merupakan tabel perbandingan antara eksisting, *resetting* dan *time domain* :

**Tabel 4.6**Data Perbandingan IE Eksisting, *Resetting* Dan *Modified*

Nama bus	IE eksisting (cal/cm <sup>2</sup> )	IE <i>resetting</i> (cal/cm <sup>2</sup> )	IE <i>modified</i> (cal/cm <sup>2</sup> )
BUS 1	40,39	136,05	122,36
BUS 2	37,35	141,3	127,5
BUS DSS MAIN	16,89	169,5	99,41
BUS MAIN F.62 KANAN	28,18	90,7	80,96874
BUS MAIN F.62 KIRI	28,18	90,7	80,96827
BUS MAIN F CACO3	25,48	82,04	73,194
BUS MAIN F PM 7.1	25,48	82,04	73,234

Dari tabel diatas besar IE *resetting* yang didapat lebih besar dibanding dengan besar IE eksisting. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya FCT yang bekerja untuk mengamankan bus yang mengalami hubung singkat. Besarnya FCT kurang lebih sama dengan *time setting* rele pada bus yang bersangkutan. Karena dalam keadaan eksisiting *time delay* sangat kecil pada bus tersebut, maka menghasilkan IE eksisting yang lebih kecil dibanding dengan IE *resetting*. Walaupun rele belum dalam keadaan terkoordinasi. Untuk itu harus dilakukan *setting* ulang rele (*resetting*) yang menghasilkan *time setting* lebih besar karena gangguan terjadi di bus 20 kV (tegangan menengah) yang mana didapat besarnya IE *resetting* seperti pada tabel diatas.

Kesimpulan yang dapat diambil adalah perbandingan antara IE *resetting* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dan IE *resetting* dengan menggunakan metode *time domain*. Berdasarkan tabel diatas besarnya IE *resetting* dengan menggunakan metode *time domain* lebih kecil dibanding dengan IE berdasarkan standar IEEE 1584-2002. Hal ini dapat terlihat pada bus DSS MAIN karena letak bus ini berada ditengah tengah terhubung dengan semua sumber dan motor. Metode *time domain* benar-benar memperhitungkan arus kontribusi di tiap *cycle* nya. Sehingga ketika masuk pada *time domain* 30 *cycle* tidak akan ada lagi arus kontribusi dari motor sinkron dan motor induksi sehingga menghasilkan arus gangguan hubung singkat 3 phase (*bolted current 3 phase fault*) yang kecil karena arus kontribusi hanya berasal dari sumber pembangkit maupun grid. Berbeda dengan besarnya IE yang didapat

berdasarkan IEEE 1584-2002 yaitu IE yang dihasilkan adalah pengaruh arus hubung singkat 3 phase yang terjadi seketika sehingga menghasilkan IE yang lebih besar. Karena itulah besarnya energi busur api dengan menggunakan metode *time domain* lebih merepresentasikan energi busur api sebenarnya.

#### 4.8 Perbandingan Antara Hasil *Flash Protection Boundary* Eksisting, *Resetting* Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 Dan *Flash Protection Boundary* Dengan Metode *Time Domain*.

**Tabel 4.7**Data Perbandingan FPB Eksisting, *Resetting* Dan *Modified*

Nama bus	FPB eksisting (m)	FPB <i>resetting</i> (m)	FPB <i>modified</i> (m)
BUS 1	5,32	9,736	9,233
BUS 2	5,11	9,923	9,425
BUS DSS MAIN	3,44	10,868	8,32
BUS MAIN F.62 KANAN	4,44	7,949	7,5111
BUS MAIN F.62 KIRI	4,44	7,949	7,51109
BUS MAIN F CACO3	4,22	7,5607	7,141
BUS MAIN F PM 7.1	4,22	7,5607	7,143

Besarnya *flash protection boundary* pada kondisi resetting juga menghasilkan nilai yang lebih besar dibanding dengan pada saat kondisi eksisting seperti yang terlihat pada tabel 4.7, hal ini disebabkan pada saat kondisi resetting dihasilkan energi busur api yang lebih besar dibanding dengan pada saat kondisi eksisting. Semakin besarnya energi busur api ini diikuti dengan semakin jauhnya jarak *flash protection boundary* atau jarak dari titik busur api yang dapat menghasilkan energi 1,2 cal/cm<sup>2</sup>. Pada saat didapat besarnya energi busur api yang sebenarnya terjadi sampai gangguan hilang menggunakan metode *time domain*, maka nilai atau besaran dari *flash protection boundary* akan mengalami penurunan seperti yang terlihat pada tabel 4.7.

#### 4.9 Pengaruh Perubahan *Fault Clearing Time* (Setelah Penambahan Rele Diferensial) Terhadap *Incident Energy* dan *Flash Protection Boundary* dengan Metode *Time Domain*.

Setelah mengetahui konfigurasi sistem di PT. Pindo Deli dapat dilakukan analisa dari *software ETAP* dan perhitungan, dapat diketahui bahwa besar busur api yang dihasilkan pada *switchgear* melebihi dari *persona protective equipment* (PPE) yang diatur pada NFPA 70E. Sehingga perlu dilakukan tindakan sistematis untuk dapat mereduksi besar busur api yang diakibatkan agar sesuai dengan standar internasional. Sebagai salah satu solusi adalah dengan menggunakan rele diferensial, karena pada rele diferensial paling lambat bekerja sekurang kurangnya 3 cycle sehingga sangat cepat untuk mengisolir arus gangguan hubung singkat yang terjadi. Semakin cepat rele pengaman mengisolir gangguan dari sistem maka akan semakin kecil pula besar insiden energi busur api yang dihasilkan pada bus *switchgear*.

**Tabel 4.8** Data Pengaruh FCT Terhadap Besarnya IE

Nama bus	FCT (s)	IE modified(cal/cm <sup>2</sup> )	Category	FCT baru (s)	IE modified baru (cal/cm <sup>2</sup> )	Category baru
BUS 1	0,6	122,36	Exceeds	0,16	33,9	Category 4
BUS 2	0,689	127,5	Exceeds	0,16	31,48	Category 4
BUS DSS MAIN	0,76	99,41	Exceeds	0,16	30,3	Category 4
BUS MAIN F.62 KANAN	0,4	80,96874	Exceeds	0,16	32,78	Category 4
BUS MAIN F.62 KIRI	0,4	80,96827	Exceeds	0,16	32,86	Category 4
BUS MAIN F CAC03	0,4	73,194	Exceeds	0,16	29,7	Category 4
BUS MAIN F PM 7.1	0,4	73,234	Exceeds	0,16	29,71	Category 4

Dari data diatas dapat dilihat telah terjadi penurunan *incident energy* akibat pangaruh semakin cepatnya rele bekerja untuk menghilangkan gangguan. Sehingga sekarang besarnya *incident energy* pada kategori 4 sesuai dengan NFPA 70E. Bahan yang cocok digunakan sesuai dengan energi busur api yang terjadi yaitu *Cotton underwear plus FR shirt & pants plus double layer switching coat and pants*.

**Tabel 4.9** Data Besarnya FPB Setelah Penambahan Rele Diferensial

Nama bus	FPB time domain (m)	FPB time domain baru (m)
BUS 1	9,233	4,86
BUS 2	9,425	4,68
BUS DSS MAIN	8,32	4,59
BUS MAIN F.62 KANAN	7,5111	4,779
BUS MAIN F.62 KIRI	7,51109	4,78
BUS MAIN F CACO3	7,141	4,549
BUS MAIN F PM 7.1	7,143	4,55

Pengaruh FCT terhadap besarnya IE juga berdampak pada besarnya *flash protection boundary* (FPB) semakin kecil *incident energy* yang terjadi maka semakin dekat juga jarak aman pekerja (*working distance*) yang di perbolehkan. Hal itu dapat terlihat pada tabel diatas. Besarnya FPB modified baru setelah waktu FCT semakin kecil akibat pengaruh rele diferensial menjadi semakin kecil juga dibanding dengan FPB modified sebelum menggunakan rele diferensial.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Pada simulasi dengan menggunakan *software ETAP* diketahui bahwa besar insiden energi busur api pada level tegangan menengah 20 kV di PT. Pindo Deli melebihi batas standar *Personal Protective Equipment (PPE)* yang diatur pada NFPA 70E-2003.
2. Pada hasil simulasi diketahui bahwa jarak antar konduktor (*gap*) dan jarak dengan pekerja (*distance*) pada masing-masing *switchgear* belum sesuai standar IEEE 1584-2002.
3. Perhitungan besar insiden energi busur api yang sesuai dengan standar IEEE 1584-2002 akan memudahkan pemilihan terhadap alat perlindungan diri yang tepat, sesuai dengan NFPA 70E-2003.
4. Secara keseluruhan metode *time domain* digunakan sebagai salah satu cara perhitungan besar energi busur api dengan memperhatikan waktu saat terjadinya gangguan hubung singkat (*time domain* tiap *cycle*) dan besar arus kontribusi dari motor sehingga diperoleh hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan perhitungan berdasarkan standar IEEE 1584-2002.
5. Dengan menambahkan rele *diferensial* dapat mereduksi energi busur api.
6. Pemilihan kategori alat perlindungan diri yang tepat dapat memberikan rasa aman dan nyaman bagi para pekerja sehingga dapat bekerja secara optimal. Selain itu juga untuk menghindari jatuhnya korban jiwa akibat ledakan busur api (*arc-blast*).

## 5.2 Saran

1. Disarankan kepada pekerja agar menggunakan *personal protection equipment* (PPE) yang sesuai dengan kategori *arc flash* yang ada.
2. Penambahan rele *diferensial* mempercepat *setting time grading* ( $\Delta t$ ) rele-rele pengaman arus untuk mereduksi besarnya energi busur api yang terjadi.
3. Perlu dilakukannya penyesuaian materi lebih lanjut tentang metode modifikasi perhitungan *arc-flash* agar didapatkan hasil yang lebih akurat khususnya pada pembagian waktu (*time domain*).
4. Disarankan dilakukan *labeling* peralatan mengenai bahaya dari *arc flash* beserta jarak *flash protection boundary*-nya



Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0

Study Case: HA

Page: 1  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### Electrical Transient Analyzer Program

#### Harmonic Load Flow

Loading Category (2): Normal

Generation Category (1): Design

Load Diversity Factor: None

Number of Buses:	<u>Swing</u> 1	<u>V-Control</u> 0	<u>Load</u> 19	<u>Total</u> 20				
Number of Branches:	<u>XFMR2</u> 7	<u>XFMR3</u> 0	<u>Reactor</u> 0	<u>Line/Cable</u> 12	<u>Impedance</u> 0	<u>Tie PD</u> 0	<u>Total</u> 19	
Number of Harm. Sources:	<u>Current</u> 30	<u>Voltage</u> 0						
Number of Filters:	18							

Method of Solution: Accelerated Gauss-Seidel

Maximum No. of Iteration: 2000

Precision of Solution: 0.0000010000

Load Flow Acceleration Factor: 1.45

System Frequency: 50 Hz

Unit System: Metric

Project Filename: Tabang\_IEEE

Output Filename: E:\tugas akhir\FIX TUGAS AKHIR\New folder\revisi program\Harmonic analisys\Untitled.HA1

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 2  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

Adjustments

Tolerance	Apply Adjustments	Individual /Global	Percent
Transformer Impedance:	Yes	Individual	
Reactor Impedance:	Yes	Individual	
Overload Heater Resistance:	No		
Transmission Line Length:	No		
Cable Length:	No		

Temperature Correction	Apply Adjustments	Individual /Global	Degree C
Transmission Line Resistance:	Yes	Individual	
Cable Resistance:	Yes	Individual	

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

ETAP  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 3  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

Bus Input Data

Bus					Load								% Limits	
					Initial Voltage		Constant kVA		Constant Z		Constant I			
ID	kV	Sub-sys	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	VTHD	VIHD
25kA for 3sec MAIN BUSBAR	11.000	1	100.0	0.0									3.00	1.50
Bus1	11.000	1	100.0	0.0	0.376	0.161							2.50	1.50
Bus6	0.380	1	100.0	-30.0	0.120	0.074	0.030	0.019					2.50	1.50
Bus9	11.000	1	100.0	0.0									2.50	1.50
Bus15	11.000	1	100.0	0.0									2.50	1.50
Bus17	11.000	1	100.0	0.0									2.50	1.50
Bus18	11.000	1	100.0	0.0									2.50	1.50
Bus19	11.000	1	100.0	0.0									2.50	1.50
Bus20	11.000	1	100.0	0.0									2.50	1.50
Bus21	11.000	1	100.0	0.0									2.50	1.50
MCC1	0.690	1	100.0	-30.0	3.057	1.369	0.000	-0.500					2.50	1.50
MCC1 DRYER	0.690	1	100.0	-30.0									2.50	1.50
MCC2	0.690	1	100.0	-30.0	2.678	1.134	0.000	-1.000					5.00	1.50
MCC2 BRIQUETTE PLANT	0.690	1	100.0	-30.0									5.00	1.50
MCC3	0.690	1	97.5	-30.0	2.343	1.000	0.000	-1.000					5.00	1.50
MCC3 PLANT	0.690	1	100.0	-30.0									5.00	1.50
MCC4	0.380	1	100.0	-30.0	0.078	0.048	0.019	0.012					2.50	1.50
MCC5	0.380	1	100.0	-30.0	0.102	0.063	0.026	0.016					2.50	1.50
PUMPING STATION	11.000	1	100.0	0.0									2.50	1.50
WTR RESRV PUMP STA	0.380	1	100.0	-30.0	0.050	0.031	0.013	0.008					2.50	1.50
Total Number of Buses: 20					8.804	3.881	0.087	-2.446	0.000	0.000	0.000	0.000		

Generation Bus				Voltage		Generation			Mvar Limits	
ID	kV	Type	Sub-sys	% Mag.	Angle	MW	Mvar	% PF	Max	Min
Bus15	11.000	Swing	1	100.0	0.0					
						0.000	0.000			

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
**7.0.0**  
  
Study Case: HA

Page: 4  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### Cable Input Data

		Ohms or Mhos / 1000 m per Conductor											
Cable		Library	Size	Length		#/Phase	T (°C)	R1	X1	Y1	R0	X0	Y0
ID				Adj. (m)	% Tol.								
Cable1		11MCUN3	300	20.0	0.00	1	75	0.076302	0.105000	0.0001646	0.238444	0.220000	
Cable5		11MCUN1	120	70.0	0.00	3	75	0.186940	0.118000	0.0001109	0.591341	0.290000	
Cable6		11MCUN3	300	360.0	0.00	2	75	0.076302	0.105000	0.0001646	0.238444	0.220000	
Cable7		11MCUN3	300	20.0	0.00	1	75	0.076302	0.105000	0.0001646	0.238444	0.220000	
Cable8		11MCUN3	300	20.0	0.00	1	75	0.076302	0.105000	0.0001646	0.238444	0.220000	
Cable9		11MCUN3	50	486.0	0.00	1	75	0.471165	0.138000	0.0000817	1.487889	0.280000	
Cable10		11MCUN3	35	830.0	0.00	1	75	0.637122	0.149000	0.0000745	2.002928	0.300000	
Cable11		11MCUN3	35	1500.0	0.00	1	75	0.637122	0.149000	0.0000745	2.002928	0.300000	
Cable12		11MCUN3	50	10.0	0.00	1	75	0.471165	0.138000	0.0000817	1.487889	0.280000	
Cable14		11MCUN3	300	20.0	0.00	1	75	0.076302	0.105000	0.0001646	0.238444	0.220000	
Cable16		11MCUN3	300	20.0	0.00	1	75	0.076302	0.105000	0.0001646	0.238444	0.220000	
Cable18		11MCUN3	300	20.0	0.00	1	75	0.076302	0.105000	0.0001646	0.238444	0.220000	

Cable resistances are listed at the specified temperatures

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 5  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### 2-Winding Transformer Input Data

Transformer ID	Rating					Z Variation			% Tap Setting		Adjusted	Phase Shift	
	MVA	Prim. kV	Sec. kV	% Z	X/R	+ 5%	- 5%	% Tol.	Prim.	Sec.	% Z	Type	Angle
T6	0.500	11.000	0.380	5.20	5.10	0	0	0	0	0	5.2000	Std Pos. Seq.	-30.000
TX1*	4.750	11.000	0.690	6.00	12.14	0	0	0	0	0	6.0000	Std Pos. Seq.	-30.000
TX2*	3.750	11.000	0.690	6.00	12.14	0	0	0	0	0	6.0000	Std Pos. Seq.	-30.000
TX3	0.350	11.000	0.380	5.20	5.10	0	0	0	0	0	5.2000	Std Pos. Seq.	-30.000
TX3*	3.250	11.000	0.690	6.00	12.14	0	0	0	0	0	6.0000	Std Pos. Seq.	-30.000
TX5*	0.350	11.000	0.380	4.50	5.10	0	0	0	0	0	4.5000	Std Pos. Seq.	-30.000
TX6*	0.350	11.000	0.380	4.50	5.10	0	0	0	0	0	4.5000	Std Pos. Seq.	-30.000

### 2-Winding Transformer Grounding Input Data

Transformer ID	Rating			Grounding								
	MVA	Prim. kV	Sec. kV	Conn. Type	Primary				Secondary			
ID	MVA	Prim. kV	Sec. kV	Type	Type	kV	Amp	Ohm	Type	kV	Amp	Ohm
T6	0.500	11.000	0.380	D/Y					Solid			
TX1*	4.750	11.000	0.690	D/Y					Solid			
TX2*	3.750	11.000	0.690	D/Y					Solid			
TX3	0.350	11.000	0.380	D/Y					Solid			
TX3*	3.250	11.000	0.690	D/Y					Solid			
TX5*	0.350	11.000	0.380	D/Y					Solid			
TX6*	0.350	11.000	0.380	D/Y					Solid			

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 6  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

**Branch Connections**

CKT/Branch		Connected Bus ID		% Positive Sequence Impedance (100 MVA Base)			
ID	Type	From Bus	To Bus	R	X	Z	Y
T6	2W XFMR	Bus1	Bus6	200.11	1020.57	1040.00	
TX1*	2W XFMR	Bus9	MCC1 DRYER	10.37	125.89	126.32	
TX2*	2W XFMR	Bus17	MCC2 BRIQUETTE PLANT	13.14	159.46	160.00	
TX3	2W XFMR	Bus19	WTR RESRV PUMP STA	285.87	1457.95	1485.71	
TX3*	2W XFMR	Bus18	MCC3 PLANT	15.16	183.99	184.62	
TX5*	2W XFMR	Bus20	MCC5	247.39	1261.69	1285.71	
TX6*	2W XFMR	Bus21	MCC4	247.39	1261.69	1285.71	
Cable1	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	Bus9	0.13	0.17	0.21	0.0003983
Cable5	Cable	Bus15	Bus1	0.36	0.23	0.43	0.0028180
Cable6	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	Bus1	1.14	1.56	1.93	0.0143399
Cable7	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	Bus17	0.13	0.17	0.21	0.0003983
Cable8	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	Bus18	0.13	0.17	0.21	0.0003983
Cable9	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	PUMPING STATION	18.92	5.54	19.72	0.0048045
Cable10	Cable	PUMPING STATION	Bus19	43.70	10.22	44.88	0.0074820
Cable11	Cable	PUMPING STATION	Bus20	78.98	18.47	81.11	0.0135217
Cable12	Cable	PUMPING STATION	Bus21	0.39	0.11	0.41	0.0000989
Cable14	Cable	MCC1 DRYER	MCC1	32.05	44.11	54.52	0.0000016
Cable16	Cable	MCC2 BRIQUETTE PLANT	MCC2	32.05	44.11	54.52	0.0000016
Cable18	Cable	MCC3 PLANT	MCC3	32.05	44.11	54.52	0.0000016

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 7  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

**Branch Connections**  
**Zero Sequence Impedance**

CKT/Branch		Connected Bus ID		% Impedance, Zero Seq., 100 MVA			
ID	Type	From Bus	To Bus	R0	X0	Z0	Y0
T6	2W Xfmr	Bus1	Bus6				
TX1*	2W Xfmr	Bus9	MCC1 DRYER				
TX2*	2W Xfmr	Bus17	MCC2 BRIQUETTE PLANT				
TX3	2W Xfmr	Bus19	WTR RESRV PUMP STA				
TX3*	2W Xfmr	Bus18	MCC3 PLANT				
TX5*	2W Xfmr	Bus20	MCC5				
TX6*	2W Xfmr	Bus21	MCC4				
Cable1	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	Bus9	0.39	0.36	0.54	
Cable5	Cable	Bus15	Bus1	1.14	0.56	1.27	
Cable6	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	Bus1	3.55	3.27	4.83	
Cable7	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	Bus17	0.39	0.36	0.54	
Cable8	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	Bus18	0.39	0.36	0.54	
Cable9	Cable	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	PUMPING STATION	59.76	11.25	60.81	
Cable10	Cable	PUMPING STATION	Bus19	137.39	20.58	138.92	
Cable11	Cable	PUMPING STATION	Bus20	248.30	37.19	251.07	
Cable12	Cable	PUMPING STATION	Bus21	1.23	0.23	1.25	
Cable14	Cable	MCC1 DRYER	MCC1	100.17	92.42	136.29	
Cable16	Cable	MCC2 BRIQUETTE PLANT	MCC2	100.17	92.42	136.29	
Cable18	Cable	MCC3 PLANT	MCC3	100.17	92.42	136.29	

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
**7.0.0**  
  
Study Case: HA

Page: 8  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### Machine Input Data

Machine		Connected Bus	Rating (Base)			% Negative Seq. Imp.			Grounding		% Zero Seq. Imp.			
ID	Type	ID	MVA	kV	RPM	X/R	R2	X2	Conn.	Type	Amp	X/R	R0	X0
Gen1	Gen.	Bus15	11.765	11.000	1500	48.00	0.250	12.00	Wye	Restr	100.0	48.00	1852.757	12.00
BUCKET ELEVATOR INCHING	IndM	MCC2	0.008	0.690	1500	2.02	13.802	27.83	Wye	Open				
BUKET ELEVATOR MAIN	IndM	MCC2	0.031	0.690	1500	4.23	6.580	27.83	Wye	Open				
COAL INJECTION FANS	IndM	MCC1	0.121	0.690	1500	5.98	3.343	20.00	Wye	Open				
COMBUSTION AIR FAN	IndM	MCC1	0.523	0.690	1500	19.13	1.045	20.00	Wye	Open				
Mtr6	IndM	MCC1	0.001	0.690	1500	0.78	35.636	27.83	Wye	Open				
Mtr8	IndM	MCC1	0.120	0.690	1500	8.56	2.338	20.00	Wye	Open				
Mtr9	IndM	MCC1	0.038	0.690	1500	4.69	5.939	27.83	Wye	Open				
Mtr10	IndM	MCC1	0.026	0.690	1500	3.83	7.274	27.83	Wye	Open				
Mtr12	IndM	MCC1	0.013	0.690	1500	2.71	10.287	27.83	Wye	Open				
Mtr13	IndM	MCC1	0.004	0.690	1500	1.34	20.807	27.83	Wye	Open				
Mtr19	IndM	MCC1	0.391	0.690	1500	16.51	1.212	20.00	Wye	Open				
Mtr20	IndM	MCC1	0.581	0.690	1500	20.17	0.992	20.00	Wye	Open				
Mtr22	IndM	MCC1	0.027	0.690	1500	3.88	7.175	27.83	Wye	Open				
Mtr25	IndM	MCC1	0.016	0.690	1500	2.02	13.802	27.83	Wye	Open				
Mtr31	IndM	MCC1	0.002	0.690	1500	0.67	41.614	27.83	Wye	Open				
Mtr33	IndM	MCC1	0.001	0.690	1500	0.78	35.636	27.83	Wye	Open				
Mtr39	IndM	MCC1	0.062	0.690	1500	6.05	3.306	20.00	Wye	Open				
Mtr40	IndM	MCC1	0.022	0.690	1500	3.49	7.968	27.83	Wye	Open				
Mtr41	IndM	MCC1	0.022	0.690	1500	3.49	7.968	27.83	Wye	Open				
Mtr42	IndM	MCC1	0.051	0.690	1500	5.49	5.074	27.83	Wye	Open				
Mtr43	IndM	MCC1	0.051	0.690	1500	5.49	5.074	27.83	Wye	Open				
Mtr47	IndM	MCC1	0.022	0.690	1500	3.49	7.968	27.83	Wye	Open				
Mtr48	IndM	MCC1	0.004	0.690	1500	1.34	20.807	27.83	Wye	Open				
Mtr49	IndM	MCC1	0.006	0.690	1500	1.80	15.431	27.83	Wye	Open				
Mtr51	IndM	MCC1	0.126	0.690	1500	4.23	6.580	27.83	Wye	Open				
Mtr55	IndM	MCC1	0.002	0.690	1500	0.90	30.862	27.83	Wye	Open				
Mtr60	IndM	MCC2	0.199	0.690	1500	7.81	2.561	20.00	Wye	Open				
Mtr61	IndM	MCC2	0.001	0.690	1500	0.78	35.636	27.83	Wye	Open				
Mtr62	IndM	MCC2	0.333	0.690	1500	4.94	5.635	27.83	Wye	Open				
Mtr65	IndM	MCC2	0.005	0.690	1500	1.56	17.818	27.83	Wye	Open				
Mtr67	IndM	MCC2	2.708	0.690	1500	10.36	1.930	20.00	Wye	Open				
Mtr68	IndM	MCC2	0.011	0.690	1500	2.47	11.269	27.83	Wye	Open				
Mtr71	IndM	MCC2	0.011	0.690	1500	2.47	11.269	27.83	Wye	Open				
Mtr74	IndM	MCC2	0.638	0.690	1500	21.15	0.946	20.00	Wye	Open				
Mtr76	IndM	MCC2	0.011	0.690	1500	2.47	11.269	27.83	Wye	Open				
Mtr77	IndM	MCC2	0.027	0.690	1500	3.88	7.175	27.83	Wye	Open				



Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
**7.0.0**  
  
Study Case: HA

Page: 9  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

Machine		Connected Bus	Rating (Base)			% Negative Seq. Imp.			Grounding			% Zero Seq. Imp.		
ID	Type	ID	MVA	kV	RPM	X/R	R2	X2	Conn.	Type	Amp	X/R	R0	X0
Mtr78	IndM	MCC2	0.005	0.690	1500	1.56	17.818	27.83	Wye	Open				
Mtr92	IndM	MCC3	0.199	0.690	1500	7.81	2.561	20.00	Wye	Open				
Mtr93	IndM	MCC3	0.001	0.690	1500	0.78	35.636	27.83	Wye	Open				
Mtr94	IndM	MCC3	0.333	0.690	1500	4.94	5.635	27.83	Wye	Open				
Mtr95	IndM	MCC3	0.040	0.690	1500	1.56	17.818	27.83	Wye	Open				
Mtr96	IndM	MCC3	2.708	0.690	1500	10.36	1.930	20.00	Wye	Open				
Mtr97	IndM	MCC3	0.011	0.690	1500	2.47	11.269	27.83	Wye	Open				
Mtr98	IndM	MCC3	0.123	0.690	1500	6.05	3.306	20.00	Wye	Open				
Mtr99	IndM	MCC3	0.003	0.690	1500	0.78	35.636	27.83	Wye	Open				
Mtr100	IndM	MCC3	0.017	0.690	1500	2.12	13.160	27.83	Wye	Open				
Mtr101	IndM	MCC3	0.001	0.690	1500	0.78	35.636	27.83	Wye	Open				
Mtr102	IndM	MCC3	0.011	0.690	1500	2.47	11.269	27.83	Wye	Open				
Mtr103	IndM	MCC3	0.027	0.690	1500	3.88	7.175	27.83	Wye	Open				
Mtr104	IndM	MCC3	0.005	0.690	1500	1.56	17.818	27.83	Wye	Open				
PULVERISER	IndM	MCC1	0.292	0.690	1500	14.26	1.403	20.00	Wye	Open				
PULVERISER BOOSTER FAN	IndM	MCC1	0.031	0.690	1500	4.23	6.580	27.83	Wye	Open				
PULVERISER CYCLONE ROTARY	IndM	MCC1	0.001	0.690	1500	0.78	35.636	27.83	Wye	Open				
RECYCLE FAN	IndM	MCC1	1.039	0.690	1500	3.86	4.318	16.67	Wye	Open				
YKK-450-4	IndM	Bus1	0.327	11.000	1500	15.09	1.223	18.46	Wye	Open				
YKK-450-6	IndM	Bus1	0.258	11.000	1500	13.38	1.380	18.46	Wye	Open				

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

ETAP  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 10  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

Harmonic Library

Devices		Current Harmonic Source in %																
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
Manufacturer	Model	25	29	31	35	37	41	43	47	49	53	55	59	61	65	67	71	73
Typical-IEEE	6 Pulse1	0	0	0	20.00	0	14.30	0	0	0	9.10	0	7.70	0	0	5.90	5.30	4.30
		4.00	3.40	3.20	2.80	2.70	2.40	2.30	2.10	2.00	0	0	0	0	0	0	0	0

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 11  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

**Harmonic Source from Library**

Bus ID	Device ID	Harmonic Source Information		
		Type	Manufacturer	Model
MCC1	VFD6	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD7	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD8	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD10	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD11	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD17	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD18	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD20	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD23	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD32	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD34	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC1	VFD36	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD40	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD41	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD42	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD45	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD46	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD49	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD54	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD55	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC2	VFD56	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD67	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD68	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD69	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD70	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD71	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD73	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD74	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD75	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1
MCC3	VFD76	Current	Typical-IEEE	6 Pulse1

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
**7.0.0**  
  
Study Case: HA

Page: 12  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### Filter Input Data

#### Filter Type: Single-Tuned

Filter	Connected Bus	Capacitor C1			Inductor L1			R
ID	ID	kV	Max kV	kvar	Xl	Q Fact.	Max I	Ohm
Filter MCC2 orde 19	MCC2	0.690	11.000	127.0	0.0104	45.00	2000.0	0.0002
Filter MCC1 orde 13	MCC1	0.690	0.690	105.0	0.0269	45.00	2000.0	0.0006
Filter MCC1 orde 17	MCC1	0.690	0.690	239.0	0.0069	45.00	2000.0	0.0002
Filter MCC1 orde 19	MCC1	0.690	11.000	145.0	0.0091	45.00	2000.0	0.0002
Filter MCC1 orde 5	MCC1	0.690	11.000	63.7	0.299	45.00	2000.0	0.0066
Filter MCC1 orde 7	MCC1	0.690	11.000	94.1	0.103	45.00	2000.0	0.0023
Filter MCC2 orde 11	MCC2	0.690	11.000	91.8	0.0429	45.00	2000.0	0.0010
Filter MCC1 orde 11	MCC1	0.690	0.690	98.7	0.0398	45.00	2000.0	0.0009
Filter MCC2 orde 17	MCC2	0.690	0.690	110.0	0.015	45.00	2000.0	0.0003
Filter MCC13 orde 13	MCC3	0.690	11.000	96.2	0.0293	45.00	2000.0	0.0007
Filter MCC2 orde 5	MCC2	0.690	11.000	74.3	0.2562	45.00	2000.0	0.0057
Filter MCC2 orde 7	MCC2	0.690	11.000	86.4	0.1124	45.00	2000.0	0.0025
Filter MCC3 orde 11	MCC3	0.690	11.000	86.7	0.0454	45.00	2000.0	0.0010
Filter MCC3 orde 17	MCC3	0.690	11.000	96.2	0.0171	45.00	2000.0	0.0004
Filter MCC3 orde 19	MCC3	0.690	11.000	111.0	0.0118	45.00	2000.0	0.0003
Filter MCC3 orde 5	MCC3	0.690	11.000	72.1	0.2641	45.00	2000.0	0.0059
Filter MCC3 orde 7	MCC3	0.690	11.000	75.6	0.1284	45.00	2000.0	0.0029
Filter MCC2 orde 13	MCC2	0.690	11.000	99.1	0.0284	45.00	2000.0	0.0006

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
**7.0.0**  
  
Study Case: HA

Page: 13  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### FUNDAMENTAL LOAD FLOW REPORT

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow				XFMR	
ID	kV	%Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	% PF	% Tap
25kA for 3sec MAIN BUSBAR	11.000	99.875	-0.1	0	0	-0.026	0.009	Bus9	3.103	0.327	164.0	99.4	
								Bus1	-8.445	0.201	443.9	-100.0	
								Bus17	2.716	-0.292	143.5	-99.4	
								Bus18	2.374	-0.409	126.6	-98.5	
								PUMPING STATION	0.278	0.165	17.0	86.0	
Bus1	11.000	99.968	0.0	0	0	0.377	0.161	Bus15	-8.979	-0.052	471.4	100.0	
								25kA for 3sec MAIN BUSBAR	8.453	-0.204	443.9	-100.0	
								Bus6	0.149	0.095	9.3	84.3	
Bus6	0.380	98.703	-30.8	0	0	0.149	0.092	Bus1	-0.149	-0.092	269.5	85.0	
Bus9	11.000	99.870	-0.1	0	0	0.004	-0.001	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	-3.103	-0.327	164.0	99.4	
								MCC1 DRYER	3.099	0.328	163.8	99.4	
* Bus15	11.000	100.000	0.0	8.982	0.051	0	0	Bus1	8.982	0.051	471.4	100.0	
Bus17	11.000	99.872	-0.1	0	0	0.004	-0.001	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	-2.716	0.292	143.5	-99.4	
								MCC2 BRIQUETTE PLANT	2.712	-0.291	143.3	-99.4	
Bus18	11.000	99.872	-0.1	0	0	0.004	-0.001	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	-2.374	0.408	126.6	-98.6	
								MCC3 PLANT	2.370	-0.407	126.4	-98.6	
Bus19	11.000	99.782	-0.1	0	0	0	0	PUMPING STATION	-0.063	-0.040	3.9	84.4	
								WTR RESRV PUMP STA	0.063	0.040	3.9	84.6	
Bus20	11.000	99.698	-0.1	0	0	0	0	PUMPING STATION	-0.128	-0.082	8.0	84.2	
								MCC5	0.128	0.082	8.0	84.2	
Bus21	11.000	99.812	-0.1	0	0	-0.018	0.014	PUMPING STATION	-0.079	-0.075	5.7	72.1	
								MCC4	0.097	0.061	6.0	84.4	
MCC1	0.690	98.129	-33.1	0	0	3.058	0.163	MCC1 DRYER	-3.058	-0.163	2610.9	99.9	
MCC1 DRYER	0.690	99.210	-32.3	0	0	0	0	MCC1	3.089	0.206	2610.9	99.8	
								Bus9	-3.089	-0.206	2610.9	99.8	
MCC2	0.690	99.399	-33.4	0	0	2.678	-0.443	MCC2 BRIQUETTE PLANT	-2.678	0.443	2285.0	-98.7	
MCC2 BRIQUETTE PLANT	0.690	100.075	-32.6	0	0	0	0	MCC2	2.702	-0.410	2285.0	-98.9	
								Bus17	-2.702	0.410	2285.1	-98.9	
MCC3	0.690	99.840	-33.3	0	0	2.343	-0.539	MCC3 PLANT	-2.343	0.539	2014.9	-97.4	
MCC3 PLANT	0.690	100.361	-32.6	0	0	0	0	MCC3	2.361	-0.514	2014.9	-97.7	
								Bus18	-2.361	0.514	2014.9	-97.7	
MCC4	0.380	98.802	-30.7	0	0	0.096	0.060	Bus21	-0.096	-0.060	174.5	85.0	
MCC5	0.380	98.357	-30.9	0	0	0.127	0.079	Bus20	-0.127	-0.079	231.0	85.0	
PUMPING STATION	11.000	99.813	-0.1	0	0	0.009	-0.007	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	-0.278	-0.169	17.1	85.4	
								Bus19	0.063	0.032	3.7	88.9	

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 14  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow					XFMR
ID	kV	%Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	% PF	% Tap
WTR RESRV PUMP STA	0.380	99.026	-30.5	0	0	0.063	0.039	Bus20	0.128	0.068	7.6	88.2	
								Bus21	0.079	0.075	5.7	72.2	
								Bus19	-0.063	-0.039	113.1	85.0	

\* Indicates a voltage regulated bus (voltage controlled or swing type machine connected to it)

# Indicates a bus with a load mismatch of more than 0.1 MVA

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
**7.0.0**  
  
Study Case: HA

Page: 15  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### SYSTEM HARMONICS INFORMATION

Bus		Voltage Distortion					Current Distortion						
ID	kV	Fund. %	RMS %	ASUM %	THD %	TIF	To Bus ID	Fund. Amp	RMS Amp	ASUM Amp	THD %	TIF	IT
25kA for 3sec MAIN BUSBAR	11.000	99.87	99.88	102.18	0.79	40.20	Bus9	163.97	163.98	167.44	1.13	73.96	12127.96
							Bus1	443.91	443.95	453.53	1.36	14.21	6306.57
							Bus17	143.55	143.58	149.30	2.27	50.21	7209.15
							Bus18	126.61	126.64	131.92	2.42	45.22	5726.13
							PUMPING STATION	16.97	16.97	17.74	1.35	103.16	1750.71
Bus1	11.000	99.97	99.97	102.25	0.78	39.67	Bus15	471.44	471.47	481.10	1.25	14.57	6869.73
							25kA for 3sec MAIN BUSBAR	443.93	443.97	453.94	1.37	16.11	7153.26
							Bus6	9.31	9.31	9.44	0.55	20.38	189.80
Bus6	0.380	98.70	98.71	100.35	0.66	24.48	Bus1	269.52	269.53	273.28	0.55	20.38	5494.11
Bus9	11.000	99.87	99.87	102.18	0.79	40.20	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	163.97	163.98	167.45	1.13	73.95	12126.64
							MCC1 DRYER	163.78	163.79	167.25	1.13	74.04	12126.64
Bus15	11.000	100.00	100.00	102.28	0.77	39.58	Bus1	471.44	471.47	481.18	1.25	14.93	7038.68
Bus17	11.000	99.87	99.87	102.18	0.79	40.21	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	143.54	143.58	149.29	2.27	50.16	7202.62
							MCC2 BRIQUETTE PLANT	143.34	143.37	149.08	2.27	50.24	7202.62
Bus18	11.000	99.87	99.88	102.18	0.79	40.21	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	126.60	126.64	131.91	2.42	45.17	5719.92
							MCC3 PLANT	126.39	126.43	131.70	2.42	45.24	5719.92
Bus19	11.000	99.78	99.78	102.11	0.79	40.80	PUMPING STATION	3.90	3.90	3.97	0.59	24.82	96.90
							WTR RESRV PUMP STA	3.91	3.91	3.97	0.59	24.80	96.90
Bus20	11.000	99.70	99.70	102.04	0.79	41.11	PUMPING STATION	7.98	7.98	8.09	0.56	20.50	163.57
							MCC5	7.98	7.98	8.09	0.56	20.50	163.57
Bus21	11.000	99.81	99.82	102.14	0.79	40.66	PUMPING STATION	5.73	5.73	5.82	0.61	23.80	136.26
							MCC4	6.03	6.03	6.12	0.58	22.61	136.27
MCC1	0.690	98.13	98.14	102.19	1.78	115.24	MCC1 DRYER	2610.92	2611.08	2666.32	1.13	74.04	193320.50
MCC1 DRYER	0.690	99.21	99.22	102.81	1.49	95.12	MCC1	2610.92	2611.08	2666.32	1.13	74.04	193323.30
							Bus9	2610.94	2611.10	2666.34	1.13	74.04	193323.30
MCC2	0.690	99.40	99.41	104.07	1.76	88.13	MCC2 BRIQUETTE PLANT	2285.04	2285.63	2376.67	2.27	50.24	114822.10
MCC2 BRIQUETTE PLANT	0.690	100.07	100.09	104.22	1.53	76.11	MCC2	2285.04	2285.63	2376.67	2.27	50.24	114824.40
							Bus17	2285.06	2285.65	2376.69	2.27	50.24	114824.40
MCC3	0.690	99.84	99.85	104.45	1.70	80.74	MCC3 PLANT	2014.90	2015.49	2099.55	2.42	45.24	91185.03
MCC3 PLANT	0.690	100.36	100.37	104.52	1.51	71.46	MCC3	2014.90	2015.49	2099.56	2.42	45.24	91187.13
							Bus18	2014.92	2015.51	2099.57	2.42	45.24	91187.13
MCC4	0.380	98.80	98.80	100.57	0.69	27.11	Bus21	174.48	174.48	177.08	0.58	22.61	3944.57
MCC5	0.380	98.36	98.36	100.02	0.67	24.76	Bus20	230.97	230.97	234.21	0.56	20.50	4734.80

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 16  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

Bus		Voltage Distortion					Current Distortion						
ID	kV	Fund. %	RMS %	ASUM %	THD %	TIF	To Bus ID	Fund. Amp	RMS Amp	ASUM Amp	THD %	TIF	IT
PUMPING STATION	11.000	99.81	99.82	102.14	0.79	40.66	25kA for 3sec MAIN BUSBAR	17.10	17.10	17.75	1.13	83.56	1428.89
							Bus19	3.71	3.71	3.93	1.76	137.63	510.45
							Bus20	7.62	7.62	8.01	1.54	120.00	914.28
							Bus21	5.72	5.72	5.81	0.60	23.55	134.76
WTR RESRV PUMP STA	0.380	99.03	99.03	100.90	0.71	29.63	Bus19	113.10	113.10	114.89	0.59	24.80	2805.08

\* IndicatesTHD (Total Harmonic Distortion) Exceeds the Limit.  
# Indicates IHD (Individual Harmonic Distortion) Exceeds the Limit.



Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 17  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### BUS TABULATION

Bus		Harmonic Voltages (% of Fundamental Voltage )																
ID	Fundamental	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
	kV	25	29	31	35	37	41	43	47	49	53	55	59	61	65	67	71	73
25kA for 3sec MAIN BUSBAR	10.986	0	0	0	0.56	0	0.18	0	0	0	0.04	0	0.02	0	0	0.01	0.01	0.26
		0.18	0.27	0.20	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus1	10.996	0	0	0	0.55	0	0.17	0	0	0	0.04	0	0.02	0	0	0.01	0.01	0.26
		0.18	0.26	0.20	0.13	0.12	0.09	0.09	0.07	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0
MCC1	0.677	0	0	0	0.57	0	0.15	0	0	0	0.04	0	0.02	0	0	0	0	0.39
		1.49	0.50	0.32	0.18	0.15	0.10	0.09	0.07	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0
MCC1 DRYER	0.685	0	0	0	0.56	0	0.16	0	0	0	0.04	0	0.02	0	0	0.01	0	0.25
		1.20	0.45	0.30	0.17	0.14	0.10	0.09	0.07	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0
MCC2	0.686	0	0	0	1.14	0	0.36	0	0	0	0.09	0	0.05	0	0	0.02	0.01	0.96
		0.63	0.33	0.28	0.20	0.18	0.14	0.12	0.10	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0
MCC2 BRIQUETTE PLANT	0.691	0	0	0	1.02	0	0.32	0	0	0	0.08	0	0.04	0	0	0.02	0.01	0.83
		0.49	0.31	0.26	0.18	0.16	0.13	0.11	0.09	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
MCC3	0.689	0	0	0	1.17	0	0.41	0	0	0	0.09	0	0.05	0	0	0.03	0.04	0.84
		0.59	0.32	0.27	0.20	0.17	0.13	0.12	0.10	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0
MCC3 PLANT	0.692	0	0	0	1.05	0	0.37	0	0	0	0.08	0	0.05	0	0	0.02	0.04	0.74
		0.47	0.31	0.25	0.18	0.16	0.13	0.11	0.09	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
MCC4	0.375	0	0	0	0.55	0	0.17	0	0	0	0.04	0	0.02	0	0	0.01	0.01	0.21
		0.13	0.19	0.13	0.08	0.07	0.05	0.05	0.04	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
MCC5	0.374	0	0	0	0.55	0	0.17	0	0	0	0.04	0	0.02	0	0	0.01	0.01	0.19
		0.13	0.17	0.12	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
PUMPING STATION	10.979	0	0	0	0.56	0	0.18	0	0	0	0.04	0	0.02	0	0	0.01	0.01	0.27
		0.18	0.27	0.20	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0
WTR RESRV PUMP STA	0.376	0	0	0	0.56	0	0.17	0	0	0	0.04	0	0.02	0	0	0.01	0.01	0.22
		0.14	0.20	0.15	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 18  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### BUS TABULATION

Bus		Harmonic Voltages (% of Nominal Voltage )																
ID	Nominal kV	2 25	3 29	4 31	5 35	6 37	7 41	8 43	9 47	10 49	11 53	12 55	13 59	14 61	15 65	17 67	19 71	23 73
25kA for 3sec MAIN BUSBAR	11.000	0 0.18	0 0.26	0 0.20	0.56 0.14	0 0.12	0.18 0.10	0 0.09	0 0.08	0 0.07	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.26 0
Bus1	11.000	0 0.18	0 0.26	0 0.20	0.55 0.13	0 0.12	0.17 0.09	0 0.09	0 0.07	0 0.07	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.26 0
MCC1	0.690	0 1.47	0 0.49	0 0.31	0.56 0.17	0 0.14	0.15 0.10	0 0.09	0 0.07	0 0.06	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0.39 0
MCC1 DRYER	0.690	0 1.19	0 0.45	0 0.29	0.56 0.17	0 0.14	0.15 0.10	0 0.09	0 0.07	0 0.06	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0 0	0.25 0
MCC2	0.690	0 0.63	0 0.33	0 0.28	1.14 0.20	0 0.18	0.36 0.13	0 0.12	0 0.10	0 0.09	0.09 0	0 0	0.05 0	0 0	0 0	0.02 0	0.01 0	0.96 0
MCC2 BRIQUETTE PLANT	0.690	0 0.49	0 0.31	0 0.26	1.02 0.18	0 0.16	0.32 0.13	0 0.11	0 0.09	0 0.08	0.08 0	0 0	0.04 0	0 0	0 0	0.02 0	0.01 0	0.83 0
MCC3	0.690	0 0.58	0 0.32	0 0.27	1.17 0.19	0 0.17	0.41 0.13	0 0.12	0 0.10	0 0.09	0.09 0	0 0	0.05 0	0 0	0 0	0.03 0	0.04 0	0.84 0
MCC3 PLANT	0.690	0 0.47	0 0.31	0 0.26	1.06 0.18	0 0.16	0.37 0.13	0 0.11	0 0.09	0 0.08	0.08 0	0 0	0.05 0	0 0	0 0	0.02 0	0.04 0	0.75 0
MCC4	0.380	0 0.13	0 0.18	0 0.13	0.55 0.08	0 0.07	0.17 0.05	0 0.05	0 0.04	0 0.03	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.20 0
MCC5	0.380	0 0.12	0 0.17	0 0.12	0.54 0.07	0 0.06	0.17 0.05	0 0.04	0 0.03	0 0.03	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.19 0
PUMPING STATION	11.000	0 0.18	0 0.27	0 0.20	0.56 0.14	0 0.12	0.18 0.10	0 0.09	0 0.08	0 0.07	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.26 0
WTR RESRV PUMP STA	0.380	0 0.14	0 0.20	0 0.15	0.55 0.09	0 0.08	0.17 0.06	0 0.05	0 0.04	0 0.04	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.22 0

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

ETAP  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 19  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

BRANCH TABULATION

Branch		% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base																
ID		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	23
		25	29	31	35	37	41	43	47	49	53	55	59	61	65	67	71	73
Cable1		0	0	0	0.25	0	0.46	0	0	0	0.11	0	0.06	0	0	0.02	0.02	1.63
		3.03	0.47	0.23	0.09	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable5		0	0	0	10.80	0	2.42	0	0	0	0.37	0	0.17	0	0	0.05	0.04	1.11
		0.69	0.88	0.62	0.38	0.32	0.23	0.20	0.16	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable6		0	0	0	11.12	0	2.48	0	0	0	0.37	0	0.17	0	0	0.05	0.04	1.05
		0.64	0.79	0.54	0.31	0.25	0.17	0.14	0.10	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable7		0	0	0	5.71	0	1.28	0	0	0	0.21	0	0.10	0	0	0.04	0.03	1.46
		1.45	0.19	0.15	0.10	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable8		0	0	0	5.39	0	1.47	0	0	0	0.21	0	0.10	0	0	0.05	0.08	1.08
		1.21	0.15	0.13	0.08	0.07	0.04	0.04	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable9		0	0	0	0.16	0	0.05	0	0	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0.15
		0.11	0.19	0.16	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable10		0	0	0	0.04	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
		0.03	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable11		0	0	0	0.07	0	0.02	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0.08
		0.06	0.10	0.08	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable12		0	0	0	0.05	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
		0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable14		0	0	0	0.25	0	0.46	0	0	0	0.11	0	0.06	0	0	0.02	0.02	1.64
		3.02	0.47	0.23	0.09	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable16		0	0	0	5.71	0	1.28	0	0	0	0.21	0	0.10	0	0	0.04	0.03	1.46
		1.45	0.19	0.15	0.10	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
Cable18		0	0	0	5.39	0	1.47	0	0	0	0.21	0	0.10	0	0	0.05	0.08	1.08
		1.21	0.15	0.12	0.08	0.07	0.04	0.03	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 20  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### BRANCH TABULATION

Branch		% Harmonic Currents (% of Fundamental Current)																
ID	Fundamental A	2 25	3 29	4 31	5 35	6 37	7 41	8 43	9 47	10 49	11 53	12 55	13 59	14 61	15 65	17 67	19 71	23 73
Cable1	163.97	0 0.97	0 0.15	0 0.07	0.08 0.03	0 0.02	0.15 0.02	0 0.02	0 0.01	0 0.01	0.03 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.52 0
Cable5	471.44	0 0.08	0 0.10	0 0.07	1.20 0.04	0 0.04	0.27 0.03	0 0.02	0 0.02	0 0.02	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0 0	0.12 0
Cable6	443.91	0 0.08	0 0.09	0 0.06	1.31 0.04	0 0.03	0.29 0.02	0 0.02	0 0.01	0 0.01	0.04 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0 0	0.12 0
Cable7	143.55	0 0.53	0 0.07	0 0.06	2.09 0.04	0 0.03	0.47 0.02	0 0.02	0 0.01	0 0.01	0.08 0	0 0	0.04 0	0 0	0 0	0.02 0	0.01 0	0.53 0
Cable8	126.61	0 0.50	0 0.06	0 0.05	2.24 0.03	0 0.03	0.61 0.02	0 0.02	0 0.01	0 0.01	0.09 0	0 0	0.04 0	0 0	0 0	0.02 0	0.03 0	0.45 0
Cable9	16.97	0 0.35	0 0.60	0 0.48	0.50 0.37	0 0.35	0.17 0.31	0 0.30	0 0.29	0 0.28	0.05 0	0 0	0.03 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.48 0
Cable10	3.71	0 0.47	0 0.80	0 0.65	0.53 0.50	0 0.47	0.19 0.41	0 0.40	0 0.38	0 0.37	0.06 0	0 0	0.03 0	0 0	0 0	0.02 0	0.02 0	0.64 0
Cable11	7.62	0 0.40	0 0.69	0 0.56	0.50 0.44	0 0.41	0.17 0.36	0 0.35	0 0.33	0 0.33	0.05 0	0 0	0.03 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.54 0
Cable12	5.72	0 0.12	0 0.16	0 0.12	0.49 0.07	0 0.06	0.15 0.05	0 0.04	0 0.03	0 0.03	0.03 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.18 0
Cable14	2610.92	0 0.97	0 0.15	0 0.07	0.08 0.03	0 0.02	0.15 0.02	0 0.02	0 0.02	0 0.02	0.03 0	0 0	0.02 0	0 0	0 0	0.01 0	0.01 0	0.52 0
Cable16	2285.04	0 0.53	0 0.07	0 0.06	2.09 0.04	0 0.03	0.47 0.02	0 0.02	0 0.01	0 0.01	0.08 0	0 0	0.04 0	0 0	0 0	0.02 0	0.01 0	0.53 0
Cable18	2014.90	0 0.50	0 0.06	0 0.05	2.24 0.03	0 0.03	0.61 0.02	0 0.01	0 0.01	0 0.01	0.09 0	0 0	0.04 0	0 0	0 0	0.02 0	0.03 0	0.45 0

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
**7.0.0**  
  
Study Case: HA

Page: 21  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

### Filter Overloading

Filter			Capacitor C1			Inductor L1			Capacitor C2			Inductor L2		
ID	Type	Connection	Max. kV	Opr. kV	% OverVolt	Max. Amp	Opr. Amp	% Overload	Max. kV	Opr. kV	% OverVolt	Max. Amp	Opr. Amp	% Overload
Filter MCC1 orde 11	3	Wye-Solid	0.690	0.611	88.6	2000.00	109.10	5.5						
Filter MCC1 orde 13	3	Wye-Solid	0.690	0.598	86.6	2000.00	107.15	5.4						
Filter MCC1 orde 17	3	Wye-Solid	0.690	0.580	84.1	2000.00	213.32	10.7						
Filter MCC1 orde 19	3	Wye-Solid	11.000	0.589	5.4	2000.00	142.06	7.1						
Filter MCC1 orde 5	3	Wye-Solid	11.000	0.932	8.5	2000.00	176.26	8.8						
Filter MCC1 orde 7	3	Wye-Solid	11.000	0.693	6.3	2000.00	142.02	7.1						
Filter MCC2 orde 11	3	Wye-Solid	11.000	0.701	6.4	2000.00	197.13	9.9						
Filter MCC2 orde 13	3	Wye-Solid	11.000	0.660	6.0	2000.00	172.43	8.6						
Filter MCC2 orde 17	3	Wye-Solid	0.690	0.627	90.9	2000.00	151.00	7.5						
Filter MCC2 orde 19	3	Wye-Solid	11.000	0.621	5.6	2000.00	157.60	7.9						
Filter MCC2 orde 5	3	Wye-Solid	11.000	1.306	11.9	2000.00	402.42	20.1						
Filter MCC2 orde 7	3	Wye-Solid	11.000	0.902	8.2	2000.00	293.00	14.6						
Filter MCC3 orde 11	3	Wye-Solid	11.000	0.711	6.5	2000.00	195.81	9.8						
Filter MCC3 orde 17	3	Wye-Solid	11.000	0.634	5.8	2000.00	139.76	7.0						
Filter MCC3 orde 19	3	Wye-Solid	11.000	0.626	5.7	2000.00	143.66	7.2						
Filter MCC3 orde 5	3	Wye-Solid	11.000	1.329	12.1	2000.00	401.16	20.1						
Filter MCC3 orde 7	3	Wye-Solid	11.000	0.947	8.6	2000.00	288.73	14.4						
Filter MCC13 orde 13	3	Wye-Solid	11.000	0.665	6.0	2000.00	172.13	8.6						

Filter Types: 0 = By-Pass, 1 = High-Pass (Damped), 2 = High-Pass (Undamped), 3 = Single Tuned, 4 = 3rd Order Damped, 5 = 3rd Order C-Type

Project: TCUP  
Location: Kalimantan Timur  
Contract:  
Engineer: Genchoel  
Filename: Tabang\_IEEE

**ETAP**  
7.0.0  
  
Study Case: HA

Page: 22  
Date: 12-30-2014  
SN: 12345678  
Revision: Base  
Config.: CLOSEFILTER

---

### Alert Summary Report

<u>Bus</u>	% Alert Settings	
	<u>Critical</u>	<u>Marginal</u>
VTBD	5.00	3.00
VIHD	3.00	2.00
<u>Transformer</u>		
Total I	100.0	95.0
<u>Filter</u>		
Capacitor kV	100.0	95.0
Inductor Amp	100.0	95.0
<u>Capacitor</u>		
Max kV	100.0	95.0
<u>Cable</u>		
Ampacity	100.0	95.0

## DAFTAR PUSTAKA

1. IEEE Std. 1584-2002., “*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation*”, by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2002.
2. Wu, Alex Y., “*Modified Medium-Voltage Arc-Flash Incident Energy Calculation Method*”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 46, No. 5, September/October, 2010.
3. Vajko, Rob., “*The Basic Arc Flash Protection*”, © National Safety, Inc., 2008.
4. Hurst, Randolph W., “*Electrical Safety and Arc Flash Handbook, volume 5*”, © National Safety, Inc., 2009.
5. Pfeiffer, John C., “*Arc Flash Article*”, Pfeiffer Engineering Co., Inc., 2008.
6. Gonen, Turan, “*Modern Power System Analysis*”, USA, 1988.
7. Wahyudi R, “*Diktat Kuliah Sistem Pengaman Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro-ITS, Surabaya, 2008.
8. Yulistya N, I Made., “*Teknik Tegangan Tinggi*”, Catatan Kuliah, Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya, 2010.
9. E. Kuffel., W.S. Zaengl., J. Kuffel., “*High Voltage Engineering Fundamentals Second Edition*”, published by Butterworth-Heinemann, 2000.
10. NFPA 70E., “*Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces 2003 Edition*”, NFPA 70E-2003.
11. Robert Luo, PhD., David Castor, P.E., “*Practical Solution Guide to Arc Flazh Hazards*”, Published by ESA, Inc., 2003.
12. Salisbury Electrical Safety., “*Electrical Safety Protection*”, Arc Safety.com
13. IEEE Std 242-2001™, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001.

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*



## BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Hafizs Juniardi, lahir di Pati, 4 Juni 1989. Penulis yang merupakan anak pertama dari tiga bersaudara pasangan Sudarmaji dan Rusmini ini mengawali pendidikan di Kabupaten Pati. Pada Tahun 2001 penulis lulus dari SD Negeri Pati kidul 01 pati. Setelah lulus penulis melanjutkan jenjang ke SMP yaitu pada SMP Negeri 3 Pati. Pada tahun 2004 penulis melanjutkan ke SMA Negeri 2 Pati dan lulus pada tahun 2007. Pada tahun 2007 penulis melanjutkan jenjang pendidikan diploma tiga di Program Studi Diploma 3 Teknik Elektro, Bidang Studi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Semarang dan lulus pada tahun 2010. Dan sekarang penulis mengikuti pendidikan Program Studi Lintas Jalur S1 Teknik Elektro, Bidang Studi Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis dapat dihubungi pada : [hafizsjuniardi@gmail.com](mailto:hafizsjuniardi@gmail.com)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*